

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/331287534>

ВІСНИК Східноукраїнського національного університету імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ №11 (165) Частина 2 2011

Conference Paper · November 2011

CITATIONS

0

READS

205

3 authors:



Valerii Kolesnikov

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Uk...

669 PUBLICATIONS 638 CITATIONS

SEE PROFILE



Alexander Balitskii

West Pomeranian University of Technology

164 PUBLICATIONS 256 CITATIONS

SEE PROFILE



Jarosław Chmiel

Maritime University of Szczecin

56 PUBLICATIONS 169 CITATIONS

SEE PROFILE

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

ВІСНИК

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№11 (165)
Частина 2
2011**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Луганськ 2011

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 11(165) 2011

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ
ВИХІД З ДРУКУ - ВІСІМНАДЦЯТЬ
РАЗІВ НА РІК

Засновник
Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 11(165) 2011

THE SCIENTIFIC JOURNAL
WAS FOUNDED IN 1996
IT IS ISSUED EIGHTEEN TIMES
A YEAR

Founder
of the Volodymyr Dal East Ukrainian
National University

Журнал зареєстровано
в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію
серія КВ № 15607-4079ПР
від 18.08.2009 р.

Registered by the Ministry
of Justice of Ukraine

Registration Certificate
KB № 15607-4079ПР
dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових видань ВАК України (Бюл. ВАК №3 2010 р.), (Бюл. ВАК №5 2010 р.), (Бюл. ВАК №3 2010 р.), (Бюл. ВАК №11 2010 р.), (Бюл. ВАК №7 2011 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з *технічних, економічних, історичних, хімічних та фізико-математичних наук* відповідно.

ISSN 1998-7927

Головна редакційна колегія: Голубенко О.Л., член-кор. Національної академії педагогічних наук, докт. техн. наук (головний редактор), Осенін Ю.І., докт. техн. наук (заступник головного редактора), Смирний М.Ф., докт. техн. наук (заступник головного редактора), Арлінський Ю.М., докт. фіз-мат. наук, Бер Р., докт. техн. наук., професор університету ім. Отто фон Гюріке, Магдебург, Німеччина, Будіков Л.Я., докт. техн. наук., Бузько І.Р., докт. екон. наук, Гадушова З., професор, декан факультету мистецтв університету Філософа Костянтина в Нитрі, Словачія, Галстян Г.А. докт. хім. наук, Голубничий П.І., докт. фіз-мат. наук, Гончаров В.М., докт. техн. наук, Довжук І.В., докт. іст. наук, Житна І.П., докт. екон. наук, Іджер М., докт. техн. наук., професор Познанського технічного університету, Польща, Красовські Е., професор університету природничих наук в Любліні, редактор наукового видання Теки і MOTROLU, Козаченко Г.В., докт. екон. наук, Кондратов С.О., докт. хім. наук, Кудюков Ю.П., докт. хім. наук, Куліков Ю.А., докт. техн. наук, Лазор Л.І., докт. юр. наук, Литвиненко В.Ф., докт. істор. наук, Максимов В.В., докт. екон. наук, Михайлюк В.П., докт. іст. наук, Нагорний Б.Г., докт. соціол. наук, Носко П.Л., докт. техн. наук, Петров О.С., докт. техн. наук, Рач В.А., докт. техн. наук, Рей Р.І., докт. техн. наук, Суханцева В.К., докт. філос. наук, Тюпало М.Ф., докт. хім. наук, Ульшин В.О., докт. техн. наук, Чапка М., докт. екон. наук, професор, іноземний член-кор. Національної академії педагогічних наук України, Польща, Шевченко Г.П., член-кор. Національної академії педагогічних наук України, докт. пед. наук., Хорошко В.О., докт. техн. наук.

Відповідальний за випуск: В.М. Грібанов

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 2 від 28.10.2011 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2011
© Of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2011

Зміст

ТЕХНІЧНІ НАУКИ	7
<u>В.М. Грибанов</u> , <i>Д.В. Ратов</i> О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПЛОТНОСТИ ПРИЛЕГАНИЯ АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ.....	7
<u>С.А. Гриднев</u> , <i>В.Н. Стрельников</i> ЗАДАЧА КАЧЕНИЯ ЭЛЛИпсоИДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ГЕЛИКОИДА.....	16
<i>М. А. Крысанов, М. К. Дёмин, Г. Ю. Осенина</i> ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА	26
<i>А.В. Кудин, Ю.Н. Тамуров</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЛОГО ПАРАМЕТРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗГИБА СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С НЕЛИНЕЙНО- УПРУГИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ.....	32
<u>Б.Н. Локотюк</u> , <i>М.А. Милостян</i> ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА	40
<i>Л.Д. Мелконов</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВИНТОВЫХ ВОЛНОВЫХ КАЛИБРОВ ЧАШЕЧНЫМИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ.	48
<i>Л.Д. Мелконов</i> ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ВОЛНОВЫХ КАЛИБРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРОВ.....	52
<i>Г.Л. Мелконов, Л.Д. Мелконов, В.А. Плахотник</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИНЕМАТИКИ 4-Х ШПИНДЕЛЬНОЙ ШЛИФО-ПОЛИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ	57
<i>В.Н. Стрельников, Ю.В. Стрельников</i> ИССЛЕДОВАНИЕ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА ЧЕРВЯЧНОГО КОЛЕСА....	59
<i>Ю.В. Стрельников</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ВИТКА ЧЕРВЯКА ОБЩЕГО ВИДА.....	67
<i>А.В. Кузнецова</i> ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСА ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С КРУГОВЫМИ ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ЗУБЬЯМИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ.....	77
<i>М.В. Тацілін, А.В. Таціліна</i> ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТУ НЕЧІТКОЮ РЕГРЕСІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ.....	86

<i>О.А. Хлестова, И.О. Берестовой</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЗАТРАТ ПРИРОДНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОСНОВЕ	90
<i>И.Н. Арнаут, В.П. Гуляев</i> ПРИРОДНЫЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДОНБАССА КАК ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА УКРАИНЫ.....	95
<i>Ю.В. Баранич, Я.К. Скліфус</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ СТІНКУ ЦИЛІНДРА ДВИГУНА 5Д49	99
<i>В.А. Вишнеvский, А.В. Вишнеvский, А.А. Кочевский, Е.Ю. Чалая</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕСКРИПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ	104
<i>В.Н. Пилипенко</i> ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФИЗИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ВИБРО-УДАРНОИМПУЛЬСНОГО УПЛОТНЕНИЯ	112
<i>А.А. Власова, В.Н. Мальков, П.Л. Носко, В.В. Ставицкий</i> МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА.....	122
<i>Д.А. Гедрович, А.И. Гедрович</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТАВА СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ СВАРКЕ ОДНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ	126
<i>М. В. Драпалюк</i> ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ И УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ.....	130
<i>А.М. Каплун, В.П. Шишов</i> ЛОКАЛИЗАЦИЯ КОНТАКТА В ГЛОБОИДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ.....	135
<i>Г.Н. Кожемякин, М.А. Наливкин, Е.А. Мирошниченко</i> ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ВИСМУТ-СУРЬМА.....	145
<i>Г.Н. Кожемякин, Л.В. Немец</i> КОНВЕКЦИЯ В РАСПЛАВЕ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ GA0.03IN0.97SB МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО	149
<i>Ю.Г. Вивденко, Ю.С. Краснобрыжева</i> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ РЕССОРНЫМ ПОДВЕШИВАНИЕМ НА ТРАНСПОРТЕ.....	155
<i>Б.Н. Локотюк, Л.В. Капуста</i> ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИИ ТЕОРИИ ИГР ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ БОЛЬШИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ.....	159
<i>В.Н. Малеткин, В.В. Некрутенко, И.Е. Голяев</i> БИОФИЗИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ НА ЧЕЛОВЕКА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	165
<i>Д.Н. Марченко, А.В. Бойко, Н.В. Клипаков</i> УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ В СИСТЕМЕ «ЭКИПАЖ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД – РЕЛЬСОВЫЙ ПУТЬ»..	169

<i>П. Л. Носко, В.Е. Шисман, А.П. Карпов, Л.М. Чокнадий</i> МОДЕЛЬ СОВМЕЩЕНИЯ СХВАТА МАНИПУЛЯТОРА С ОБЪЕКТОМ	176
<i>Ю.И. Статывка, А.С. Тимошин</i> НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ	182
<i>О.А. Погорелов, В.А. Колесников, А.И. Балицкий</i> ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧАСТИЦ ИЗНОСА МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ.....	187
<i>Н.Л. Утутов, А.П. Карпов, С.Ю. Ефанов</i> О ФУНКЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ КРИВОШИПНО- ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА	192
<i>Т.А. Шинкарева, А.И. Гедрович</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ БОРЬБЫ С ПЫЛЬЮ В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ.....	196
<i>В.П. Шишов, П.Л. Носко, А.А. Муховатый</i> ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ГЕОМЕТРО- КИНЕМАТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ В ОКОЛОПОЛЮСНОЙ ЗОНЕ	198
<i>В.П. Шишов, П.Л. Носко, А.А. Муховатый, Ю.А. Скляр</i> ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ИСХОДНОГО КОНТУРА ЗУБЬЕВ ПРЯМОЗУБЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ПРИ СМЕЩЕНИИ ИСХОДНОГО КОНТУРА.....	207
<i>В.А. Плахотник, Л.Д. Мелконов, Г.Л. Мелконов</i> МЕХАНИЗМ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОМ РЕЗАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ.	212
<i>Г.Л. Мелконов, Л.Д. Мелконов, В.А. Плахотник</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ИСПО- ЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ 4-Х ШПИНДЕЛЬНОЙ ШЛИФО- ПОЛИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	218
<i>М.Д. Солодовник, Н.В. Клипаков</i> ЗАДАЧА О ДВИЖЕНИИ ПОИСКОВОГО ДИСКА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	223
<i>Oleksandr Baiev, Valentine Lazurik</i> ADVANTAGES OF NEURAL NETWORKS FOR DERIVING AN ELECTRONS SPECTRUM FROM DEPTH-CHARGE CURVE.....	228
<i>Ю.Г. Качан, В.В. Степкин, Ю.Б. Спекторова</i> О ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ПЕЧЕЙ.....	237
<i>Д.С. Клочан, А.В. Калюжный, П.Ю. Войлов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СВЕТСОБИРАНИЯ В ПЛОСКИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С МАЛЫМ ОТНОШЕНИЕМ ПЛОЩАДИ ВХОДНОГО ОКНА ФОТОПРИЕМНИКА К ВЫХОДНОМУ ОКНУ ДЕТЕКТОРА.....	240
<i>Tetiana Malykhina</i> USAGE OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY FOR VISUALIZATION AND CHARACTERIZATION OF MICROSTRUCTURES	246
<i>В.Ю. Солдатенко, Э.В. Жариков</i> МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	250

Е. Г. Толстолужская, Ю. А. Артюх
ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СИНТЕЗА ВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ254

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ262

А.І. Єрмаков
ЗАДАЧА ДІРІХЛЕ ТА ТЕОРЕМИ ВЕЙСРШТРАССА ПРО НАБЛИЖЕННЯ262

М.И. Львова, В.С. Щелоков
ТРЕХВРЕМЕННЫЕ ФУНКЦИИ ГРИНА НОРМАЛЬНЫХ БОЗЕ-СИСТЕМ266

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ.....276

В.М. Даніч, Ю.В. Кучма
ВИКОРИСТАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БІЗНЕСІ276

В.М. Даніч, С.М. Шевченко
МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛІНСЬКИХ АРХІТЕКТУР ПІДПРИЄМСТВ
ВУГІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ.....281

П. В. Кривуля, В. В. Дьоміна
НОВІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТУ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ
БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ТА КОМБІНОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА287

Р. М. Лавренюк
КОНТЕНТ-АНАЛІЗ САЙТІВ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ, ЩО НАДАЮТЬ
ОСВІТНІ ПОСЛУГИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГІЙ.....294

Є.І. Черняєвська
РЕСТРУКТУРИЗАЦІЯ ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ:
АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ.302

Т.В. Щолокова
АНАЛІЗ РИЗИКІВ В УНІВЕРСАЛЬНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ З
ДИВЕРСИФІКОВАНИМ РИНКОМ ЗБУТУ. ЧАСТИНА 1.306

О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПЛОТНОСТИ ПРИЛЕГАНИЯ АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ

Рассматривается получение аналитического выражения одного из важных критериев работоспособности передач – коэффициента плотности прилегания активных поверхностей зубьев винтовых передач, который характеризует условия образования масляного клина, напряженное состояние и несущую способность зубьев винтовой передачи.

Ключевые слова: винтовая передача, коэффициент плотности прилегания, активная поверхность зубьев, контактные напряжения, эллиптическая площадка контакта, обобщенный закон Гука, гипотеза Винклера, абсолютные деформации, коэффициент эллиптичности.

В машиноведении работоспособность зубчатых передач принято оценивать качественными показателями [2] – критериями, характеризующими локально-кинематические и гидродинамические явления в зоне контакта зубьев, а также нагрузочную способность передач.

Контактные напряжения, возникающие в точке соприкосновения зубьев, в конечном итоге, способствуют усталостному разрушению контактной поверхности зубьев. Это разрушение проявляется в выкрашивании поверхностей.

Введем в рассмотрение коэффициент плотности прилегания боковой поверхности зуба (K_p) [2, 5, 6], который характеризует напряженное состояние зуба винтовой передачи:

$$K_p = \frac{S}{S_z} \tag{1}$$

здесь S - площадь площадки мгновенного контакта; S_z - площадь боковой поверхности зуба винтовой гиперболоидной передачи.

Коэффициент K_p является, в определенной мере, аналогом коэффициента K_S сравнительного напряженного состояния зубьев передачи [2].

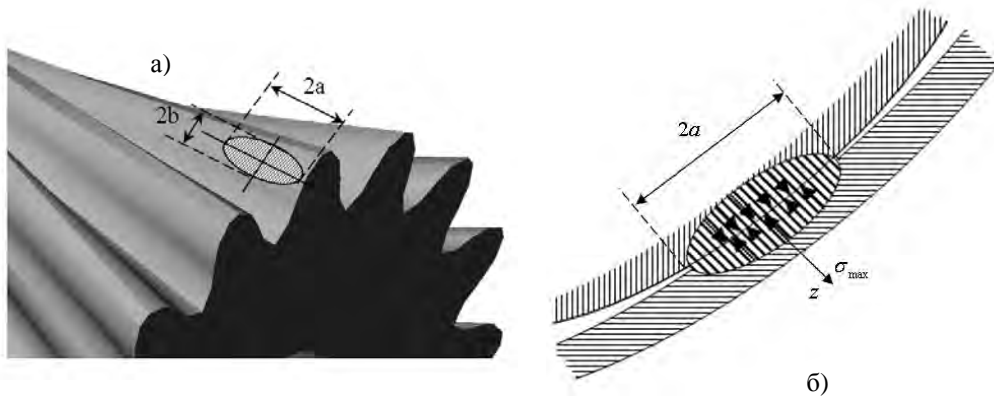


Рис. 1. (а) Эллиптическая форма площадки контакта боковой поверхности винтовой передачи; (б) эпюра распределения напряжений по Герцу в полюсе зацепления винтовой пары

Физический смысл коэффициента плотности прилегания: увеличение (уменьшение) коэффициента K_p означает увеличение (уменьшение) нагрузочной способности

зубьев и контактной прочности и, как следствие, повышение (уменьшение) долговечности всей передачи.

В данной работе принимается гипотеза о том, что реальная площадка контакта винтовых передач с достаточной для решения практических задач точностью может быть представлена эллипсом (рис 1.а). Данная гипотеза подтверждается исследованиями последних лет [4]. Размер эллиптической площадки контакта зависит от геометрических параметров контактирующих поверхностей, модулей упругости материала зубчатых колес и нормальной нагрузки на зубьях колеса.

Нормальная нагрузка P_n распределяется по всей площадке эллипса (площадке мгновенного контакта) (рис 1.а), имеющей площадь, определяемую по формуле:

$$S = \pi ab, \quad (2)$$

где a — большая полуось эллипса контакта; b — малая полуось эллипса контакта.

Уравнение этого эллипса имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (3)$$

Давление в любой точке эллиптической площадки пропорционально аппликате z полуэллипсоида напряженного состояния (рис 1.б):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (4)$$

где a, b, c — полуоси эллипсоида напряженного состояния.

С другой стороны, площадь боковой поверхности зуба винтовой гиперболической передачи S_z определим по формуле:

$$S_z = LL_a, \quad (5)$$

где L - длина зуба (длина образующей однополосного гиперболического), L_a -длина дуги профиля боковой поверхности зуба.

Длина зуба L определяется по формуле (рис. 2.а)

$$L = \frac{H}{\cos \beta_n} \quad (6)$$

Поскольку уравнение однополосного гиперболического вращения имеет вид $x^2 + y^2 - \text{tg}^2 \beta_n z^2 = r_1^2$, то высота гиперболического (ширина венца шестерни) будет равна:

$$H = 2 \text{ctg} \beta_n \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \quad (7)$$

где H - ширина венца, r_t -радиус горловины гиперболического, r_1 -радиус гиперболического в торце, β_n -угол наклона образующей к оси вращения (рис. 2.а).

Длина дуги L_a зависит от радиуса профиля и высоты зуба (рис. 2.б)

$$L_a = \rho_a \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right) \quad (8)$$

Таким образом, коэффициент плотности прилегания может быть определен по формуле

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{S}{S_z} = \frac{\pi ab \cos \beta_n}{2 \text{ctg} \beta_n \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \rho_a \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} = \\ &= \frac{\pi ab \sin \beta_n}{2 \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} \quad (9) \end{aligned}$$

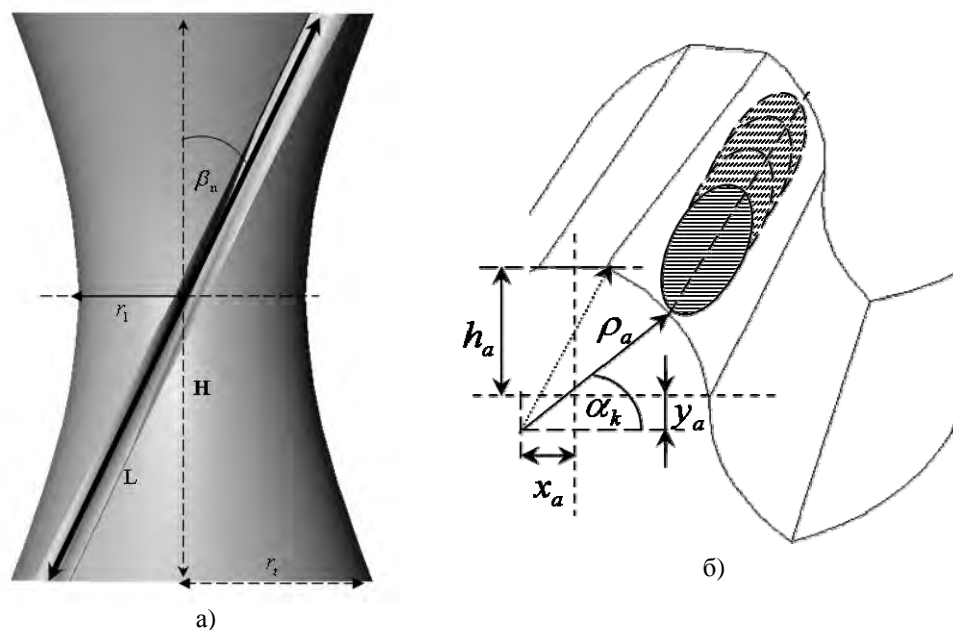


Рис. 2. К определению длины зуба L (а) и длины дуги L_a (б)

Для нахождения большой и малой полуосей эллипса мгновенного контакта (рис 1.а) воспользуемся обобщенным законом Гука и гипотезой Винклера [9, 11]. Для этого определим функцию контактных деформаций:

$$D(x, y) = B(x, y) \sigma_H(x, y), \quad (10)$$

где $B(x, y)$ - коэффициент упругости сопряженной пары зубьев, $\text{мм}^3/\text{Н}$ (является величиной переменной); $\sigma_H(x, y)$ - функция контактных напряжений.

Определим функцию контактных напряжений зубьев винтовых колес.

Воспользовавшись (4), выразим контактные напряжения в любой точке внутри эллиптического контура через максимальное (нормальное) напряжение в центре площадки:

$$\sigma_H = P = P_{\max} \frac{z}{c} = P_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (11)$$

Функция контактной деформации примет вид:

$$D(x, y) = \frac{a^2}{2\rho} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} = \frac{b^2}{2R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (12)$$

Нормальное напряжение P_n определим через напряжение P в любой внутренней точке эллиптического контура следующим образом:

$$P_n = \int_S P dS = \frac{P_{\max}}{c} \int_S z dS, \quad (13)$$

где объем полуэллипсоидного сжатия

$$\int_S z dS = \frac{2}{3} \pi a b c \quad (14)$$

Подставив значение интеграла из (14) в (13), получим выражение для определения максимального нормального контактного напряжения в центре площадки

$$P_{\max} = \sigma_{\max} = \frac{3P_n}{2\pi ab} = \frac{1,5P_n}{S}. \quad (15)$$

Из (16) очевидно, что максимальное напряжение в центре эллиптической площадки упругого контакта σ_{\max} в 1,5 раза больше среднего напряжения, заданного формулой:

$$\sigma_s = \frac{P_n}{\pi ab} = \frac{P_n}{S} \quad (16)$$

Контактное напряжение не является линейной функцией нормальной нагрузки P_n и с ростом P_n растет все медленнее. Это объясняется тем, что под действием нагрузки P_n происходит местная упругая деформация небольшого объема металла в зоне контакта. В результате этого контактирующие зубья сближаются. Сближение происходит так, что точки зубьев, лежащие вне зоны деформации перемещаются на некоторую величину вдоль оси z . Поэтому с увеличением P_n увеличиваются a , b , при этом увеличивается площадь площадки мгновенного контакта (2) и, следовательно, уменьшаются контактные напряжения.

Для получения коэффициента B формулы (10) в виде константы заменим реальную эпюру распределения напряжений $\sigma_H(x, y)$ по эллиптической площадке контакта (рис 1.б) эпюрой средних напряжений σ_s (17), равномерно распределенных по данной площадке контакта.

Тогда (15) преобразуется к виду:

$$\sigma_{\max} = \frac{3P_n}{2\pi ab} = \frac{3}{2}\sigma_s. \quad (17)$$

После замены в уравнении (10) переменной величины коэффициента упругости $B(x, y)$ константой B уравнение примет вид

$$D(x, y) = B\sigma(x, y). \quad (18)$$

Для использования функции (19) необходимо найти выражение коэффициента упругости B . С этой целью сначала воспользуемся зависимостью, характеризующей взаимосвязь между упругими перемещениями (деформациями) D зубьев и возникающими в них напряжениями [9], а именно:

$$D_m = K_m \sigma_s^n, \quad (19)$$

где K_m - размерный параметр, мм/МПа; n - показатель степени, равный 0,7...0,8 [8, 10] (применительно к точечному контакту тел необходимо исходить из степени $n = 0,7$).

Применительно к сопряженной паре зубьев шестерни и колеса уравнения контактных напряжений, на основе обобщенного закона Гука, имеют вид [11]

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{(\varepsilon_{zy} + \nu_1 \varepsilon_{zx})E_1}{1 - \nu_1^2}; \\ \sigma_2 = \frac{(\varepsilon_{zy} + \nu_2 \varepsilon_{zx})E_2}{1 - \nu_2^2} \end{cases} \quad (20)$$

где $\varepsilon_{zx} = \frac{\Delta L_{zx}}{L_x}$, $\varepsilon_{zy} = \frac{\Delta L_{zy}}{L_y}$ - относительные деформации; ΔL_{zx} , ΔL_{zy} - абсолютные деформации; $L_x = 2a$, $L_y = 2b$ - длины осей контактного эллипса, ν_1 , ν_2 - коэффициенты Пуассона, E_1 , E_2 - модули упругости материалов зубьев.

При равенстве $\Delta L_{zx} = \Delta L_{zy}$ получаем выражение $\varepsilon_{zx}L_x = \varepsilon_{zy}L_y$, исходя из которого при $L_x = 2a$, $L_y = 2b$, $\frac{a}{b} = \alpha$ (α - коэффициент эллиптичности [12]) - получим соотношения:

$$\frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zx}} = \frac{L_x}{L_y} = \frac{2a}{2b} = \frac{a}{b} = \alpha; \quad \varepsilon_{zy} = \alpha\varepsilon_{zx}$$

Учитывая, что $\Delta L_{zx} = \frac{a^2}{2\rho}$, то $\varepsilon_{zy} = \varepsilon_{zx}\alpha = \frac{\Delta L_{zx}}{L_x}\alpha = \frac{a^2}{2\rho 2a}\alpha = \frac{a}{4\rho}\alpha$, где

$\rho = \frac{\rho_a\rho_f}{\rho_a + \rho_f}$ - приведенный радиус кривизны боковых профилей зубьев.

После подстановки правой части зависимости $\varepsilon_{zy} = \alpha\varepsilon_{zx} = \frac{a}{4\rho}\alpha$ в уравнения (20)

они примут вид:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\varepsilon_{zx}(\alpha + \nu_1)E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{a(\alpha + \nu_1)E_1}{4\rho(1 - \nu_1^2)}; \\ \sigma_2 = \frac{\varepsilon_{zx}(\alpha + \nu_2)E_2}{1 - \nu_2^2} = \frac{a(\alpha + \nu_2)E_2}{4\rho(1 - \nu_2^2)} \end{cases} \quad (21)$$

На основе зависимости (19) при $n = 0,7$ и выражений (21) получим два уравнения упругих перемещений сопряженной пары зубьев:

$$\begin{cases} D_1 = K_1\sigma_1^{0,7} = K_1\left(\frac{a(\alpha + \nu_1)E_1}{4\rho(1 - \nu_1^2)}\right)^{0,7} \\ D_2 = K_2\sigma_2^{0,7} = K_2\left(\frac{a(\alpha + \nu_2)E_2}{4\rho(1 - \nu_2^2)}\right)^{0,7} \end{cases} \quad (22)$$

Из (22), учитывая, что $D = \Delta L_{zx} = a^2/(2\rho)$ получим зависимости размерных параметров:

$$\begin{cases} K_1 = D_1\left(\frac{4\rho}{a}\frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1}\right)^{0,7} = \frac{a^2}{2\rho}\left(\frac{4\rho}{a}\right)^{0,7}\left(\frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1}\right)^{0,7} = 2^{0,4}\frac{a^{1,3}}{\rho^{0,3}}\left(\frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1}\right)^{0,7} \\ K_2 = D_2\left(\frac{4\rho}{a}\frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2}\right)^{0,7} = \frac{a^2}{2\rho}\left(\frac{4\rho}{a}\right)^{0,7}\left(\frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2}\right)^{0,7} = 2^{0,4}\frac{a^{1,3}}{\rho^{0,3}}\left(\frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2}\right)^{0,7} \end{cases} \quad (23)$$

Далее, исходя из зависимости (16) и выражений (23), найдем уравнения контактной упругости зубьев шестерни и колеса:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{D_1}{P_n} = \frac{K_1\sigma_s^{0,7}}{P_n} = \frac{2^{0,4}a^{1,3}}{\rho^{0,3}P_n}\left(\frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1}\right)^{0,7}\left(\frac{P_n\alpha}{\pi a^2}\right)^{0,7} = \frac{2^{0,4}}{\pi^{0,7}a^{0,1}(\rho P_n)^{0,3}}\left(\frac{\alpha(1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1)E_1}\right)^{0,7} \\ \delta_2 = \frac{D_2}{P_n} = \frac{K_2\sigma_s^{0,7}}{P_n} = \frac{2^{0,4}a^{1,3}}{\rho^{0,3}P_n}\left(\frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2}\right)^{0,7}\left(\frac{P_n\alpha}{\pi a^2}\right)^{0,7} = \frac{2^{0,4}}{\pi^{0,7}a^{0,1}(\rho P_n)^{0,3}}\left(\frac{\alpha(1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2)E_2}\right)^{0,7} \end{cases} \quad (24)$$

С учетом размера эллиптической площадки контакта (2), равной $S = \pi ab$, и зависимостей (24) определим выражение коэффициента упругости:

$$\begin{aligned}
B &= S(\delta_1 + \delta_2) = \pi a b (\delta_1 + \delta_2) = \pi \frac{a^2}{\alpha} (\delta_1 + \delta_2) = \\
&= \pi \frac{a^2}{\alpha} \cdot \frac{2^{0,8}}{\pi^{0,7} a^{0,1} (\rho P_n)^{0,3}} \left(\left(\frac{\alpha(1-\nu_1^2)}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{\alpha(1-\nu_2^2)}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) = \\
&= \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7}}{(\alpha \rho P_n)^{0,3}} \left(\left(\frac{1-\nu_1^2}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{1-\nu_2^2}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) \quad (25)
\end{aligned}$$

В соответствии с выражением (25) функция (18) контактной деформации зубьев примет окончательный вид

$$D(x, y) = \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7}}{(\alpha \cdot \rho \cdot P_n)^{0,3}} \left(\left(\frac{1-\nu_1^2}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{1-\nu_2^2}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) \sigma(x, y) \quad (26)$$

Исходя из (13) и (26), принимая во внимание (12) запишем уравнение, характеризующее напряженно - деформированное состояние рассматриваемой сопряженной пары зубьев:

$$\begin{aligned}
BP_n &= B \int_S P dS = B \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sigma(x, y) dx dy = \\
&= \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7} P_n}{(\alpha \cdot \rho \cdot P_n)^{0,3}} \left(\left(\frac{1-\nu_1^2}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{1-\nu_2^2}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) = \\
&= \frac{a^2}{2\rho} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} dx dy = \frac{a^2}{2\rho} \cdot \frac{2}{3} \pi ab = \frac{\pi a^3 b}{3\rho} = \frac{\pi a^4}{3\alpha\rho}
\end{aligned} \quad (27)$$

Преобразуем данное уравнения к виду

$$a^{2,1} = 2^{0,8} \cdot 3 \cdot \frac{(\alpha \rho P_n)^{0,7}}{\pi^{0,3}} \left(\left(\frac{1-\nu_1^2}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{1-\nu_2^2}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) \quad (28)$$

Возводя левую и правую части последнего равенства в степень 10/21, получим величину малой полуоси эллипса

$$a = 1,8658 \sqrt[3]{\left(\left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_1^2)}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_2^2)}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{10}{7}}} \quad (29)$$

На основании зависимости (29) представим выражение большой полуоси эллиптической площадки контакта

$$b = \frac{a}{\alpha} = \frac{1,8658}{\alpha} \sqrt[3]{\left(\left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_1^2)}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_2^2)}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{10}{7}}} \quad (30)$$

Тогда (2) преобразуется к виду:

$$S = \pi \frac{3,478}{\alpha} \sqrt[3]{\left(\left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_1^2)}{(\alpha+\nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{\alpha \rho P_n (1-\nu_2^2)}{(\alpha+\nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{20}{7}}} \quad (31)$$

И окончательно коэффициент плотности прилегания (9), с учетом (31), примет вид:

$$K_p = \frac{S}{S_z} = \frac{\pi a b \sin \beta_n}{2 \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} = \frac{3,478 \cdot \pi \sin \beta_n^3 \sqrt[3]{\left(\frac{\alpha \rho P_n (1 - v_1^2)}{(\alpha + v_1) E_1} \right)^{0,7} + \left(\frac{\alpha \rho P_n (1 - v_2^2)}{(\alpha + v_2) E_2} \right)^{0,7}}}{\alpha \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} \quad (32)$$

На практике при расчетах передач имеем $v_1 = v_2 = v = 0,3$, а $E_1 = E_2 = E$, в связи с чем, выражение (32) будет упрощено:

$$K_p = \frac{6,73 \cdot \pi \sin \beta_n^3 \sqrt[3]{\left(\frac{\alpha \rho P_n (1 - v^2)}{(\alpha + v) E} \right)^2}}{\alpha \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left(\arcsin \left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left(\frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} \quad (33)$$

Иследуем характер влияния параметров передачи на коэффициент плотности прилегания (33) (рис. 3 - рис. 6).

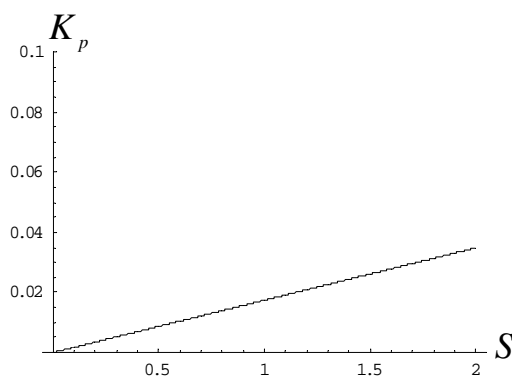


Рис. 3. Зависимость K_p - коэффициента плотности прилегания от S - площади контакта боковой поверхности зуба

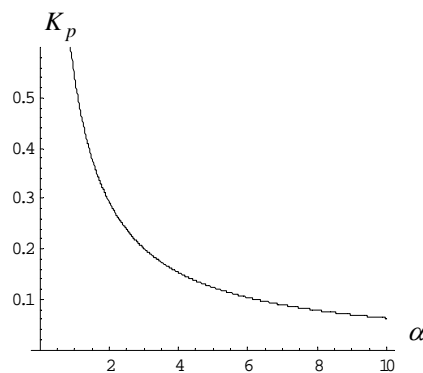


Рис. 4. Зависимость K_p - коэффициента плотности прилегания от α - коэффициента эллиптичности

Из рис.3-6 видно, что при увеличении P_N - нормального напряжения в номинальной точке контакта или увеличении S - площади площадки мгновенного контакта (что может являться следствием возрастания P_N) значение коэффициента плотности прилегания увеличивается, а поэтому увеличивается и несущая способность, улучшаются условия образования масляного клина, уменьшается трение и увеличивается к.п.д. передачи. Поэтому справедливо можно заключить, что несущая способность зубчатой передачи находится в прямой зависимости от коэффициента плотности прилегания, и потому его следует рассматривать как критерий для выбора параметров зубчатого венца с точки зрения наилучших прочностных характеристик.

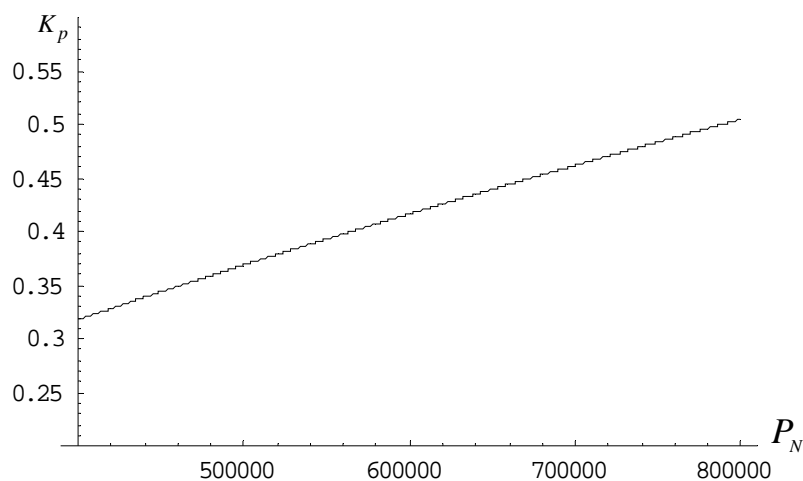


Рис. 5. Зависимость K_p - коэффициента плотности прилегания от P_N - нормального напряжения в номинальной точке контакта

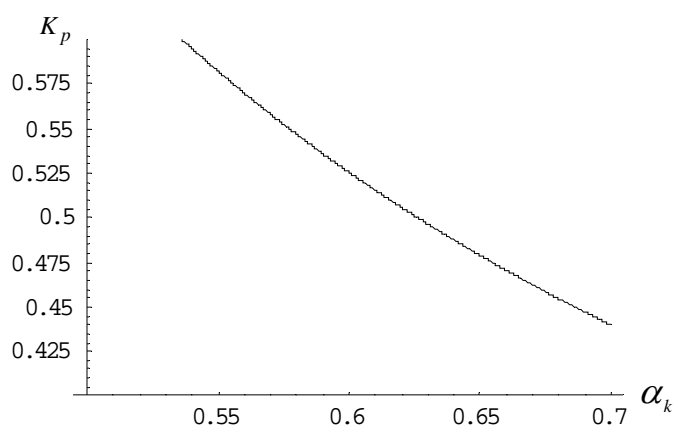


Рис. 6. Зависимость K_p - коэффициента плотности прилегания от α_k - угла давления в номинальной точке контакта

Литература

1. Медінцева Ю. В., Балицька Т. Ю., Ратов Д. В. Чисельний багатокритеріальний синтез передач Новікова ДЛЗ. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2007. - № 12 (118). – Частина 1. – с. 52 – 56.
2. Грибанов В.М. Теория гиперболических зубчатых передач.- Луганск: Изд-во Восточно-укр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. – 272 с.
3. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением.- М: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1958.-186 с.
4. Проектирование зубчатых конических и гипоидных передач. – Инструкционные материалы фирмы “Глиссон” (США). – М. – 2001. – 274с.
5. Павленко А.В., Федякин Р.В., Чесноков В.А. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова.- Киев: Техніка, 1978.-144 с.
6. Соппротивление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища Школа. Головное изд-во, 1979. – 696с.
7. Попов А.П., Селивановский В.Ю. Новый метод расчета контактных напряжений в зацеплении Новикова// Вестник национального технического университета «ХПИ». - 2003. - №8. - с. 82-87.
8. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971.— 264 с.

9. Попов А.П. Контактная прочность зубчатых механизмов.— Николаев: Изд-во НУК, 2008.— 580 с.
10. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. ЦНИИТМАШ.— М., 1946.
11. Андреев А.В. Расчет деталей при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение, 1981.— 215 с.
12. Шишов В.П., Носко П.Л., Величко Н.И., Карпов А.П. Высоконагруженные винтовые зубчатые передачи. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009.— 240 с.

References

1. Medinceva Ju. V., Balic'ka T. Ju., Ratov D. V. Chisel'nij bagatokriterial'nij sintez peredach Novikova DLZ. // Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja – 2007. - № 12 (118). – Chastina 1. – s. 52 – 56.
2. Gribanov V.M. Teorija giperboloidnyh zubchatyh peredach.- Lugansk: Izd-vo Vostochnoukr. nac. un-ta im. V. Dalja, 2003. – 272 s.
3. Novikov M.L. Zubchatye peredachi s novym zacepleniem.- M: VVIA im. N.E. Zhu-kovskogo, 1958.-186 s.
4. Proektirovanie zubchatyh konicheskikh i gipoidnyh peredach. – Instrukcionnye materialy firmy “Glisson” (SShA). – М. – 2001. – 274s.
5. Pavlenko A.V., Fedjakin R.V., Chesnokov V.A. Zubchatye peredachi s zacepleniem Novikova.- Kiev: Tehnika, 1978.-144 s.
6. Soprotivlenie materialov: Uchebnik dlja vuzov / Pod obw. red. G.S. Pisarenko. – Kiev: Viwa Shkola. Golovnoe izd-vo, 1979. – 696s.
7. Popov A.P., Selivanovskij V.Ju. Novyj metod rascheta kontaktnyh naprjazhenij v zaceplenii Novikova// Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI». – 2003. - №8. - s. 82-87.
8. Levina Z.M., Reshetov D.N. Kontaktnaja zhestkost' mashin. – М.: Mashinostroenie, 1971.— 264 s.
9. Popov A.P. Kontaktnaja prochnost' zubchatyh mehanizmov.— Nikolaev: Izd-vo NUK, 2008.— 580 s.
10. Ryzhov Je.V. Kontaktnaja zhestkost' detalej mashin. CNITMASH.— М., 1946.
11. Andreev A.V. Raschet detalej pri slozhnom naprjazhenom sostojanii. – М.: Mashinostroenie, 1981.— 215 s.
12. Shishov V.P., Nosko P.L., Velichko N.I., Karpov A.P. Vysokonagruzhennye vintovye zubchatye peredachi. – Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalja, 2009.— 240 s.

В.М. Грібанов, Д.В. Ратов

Про коефіцієнт щільності прилягання активних поверхонь зубів гвинтових передач

Розглядається одержання аналітичного вираження одного з важливих критеріїв працездатності передач—коефіцієнта щільності прилягання активних поверхонь зубів гвинтових передач, що характеризує напружений стан зубів гвинтової передачі.

Ключові слова: гвинтова передача, коефіцієнт щільності прилягання, активна поверхня зубів, контактні напруги, еліптична площина контакту, узагальнений закон Гука, гіпотеза Вінклера, абсолютні деформації, коефіцієнт еліптичності.

V.M. Gribanov, D.V. Ratov

About factor of density engagement active surfaces of helical gears teeth

Reception of analytical expression one of the important criteria of serviceability transfers - factor of density engagement active surfaces of helical gears teeth, which characterizes conditions of formation an oil wedge, an intense condition and carrying ability of helical gears teeth.

Key words: a helical gear, factor of density engagement, an active surface of teeth, contact pressure, an elliptic platform of the contact, generalized Hooke's law, hypothesis of Winkler, absolute deformations, ellipticity of ellipse.

Грібанов В.М. – д.т.н., проф., завідує кафедрою "Прикладна математика"

Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

Ратов Д. В. – асистент кафедри "Прикладна математика" Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Шишов В.П., д.т.н., проф. кафедри "Машиноведение" Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

ЗАДАЧА КАЧЕНИЯ ЭЛЛИПСОИДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ГЕЛИКОИДА

Получена система дифференциальных уравнений, описывающих качение эллипсоида по поверхности геликоида в поле силы тяжести. Задача решена для неголономной связи одноточечного контакта идеально шероховатых поверхностей. В качестве обобщенных координат приняты угловые величины, описывающие положение точки контакта, и углы Эйлера, определяющие положение эллипсоида на винтовой поверхности. Обоснованы начальные и граничные условия.

Ключевые слова: эллипсоид, геликоид, поверхность, кривизна, образующая.

Задача качения тела по поверхности является одной из задач механики неголономных систем [1 – 3]. Для решения задач подобного класса П. Аппелем [4], П. В. Воронцовом [5], И. Ценовым [6, 7], С. А. Чаплыгиным [8] были получены специальные уравнения, решены ряд задач об устойчивости движения колесных систем: шасси самолета [9], скакаты автомобиля, колеса локомотива, а также задачи качения различных тел: качение шара и эллипсоида по плоскости [10], движение шара в цилиндре и конусе.

В данной работе использованы уравнения Аппеля, получены дифференциальные уравнения, описывающие качение эллипсоида по винтовой поверхности.

Определим положение текущей точки контакта M эллипсоида с поверхностью геликоида в инерционной системе координат $x y z$ (рис. 1)

$$\left. \begin{aligned} x_M &= \frac{h}{2\pi} \cos \alpha \cos \varphi \operatorname{ctg} \nu, \\ y_M &= \frac{h}{2\pi} \cos \alpha \sin \varphi \operatorname{ctg} \nu, \\ z_M &= \frac{h}{2\pi} (\varphi + \sin \alpha \operatorname{ctg} \nu), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где α – угол наклона образующей поверхности геликоида к плоскости перпендикулярной его оси; h – шаг винта; φ – полярная координата; ν – угловая координата.

Точка M является началом подвижной системы координат $X Y Z$. Ось X направлена по образующей геликоида и проходит через точку M , ось Z – по нормали к поверхности, так, что образует острый угол с осью z .

В центре масс эллипсоида C расположим системы координат $X' Y' Z'$ и $x^* y^* z^*$. При этом $X' // X$, $Y' // Y$, $Z' // Z$, ось z^* направим по оси симметрии эллипсоида, а ось x^* расположим перпендикулярно осям Z' и z^* так, чтобы кратчайшим углом поворота от Z' к z^* , при наблюдении со стороны положительного направления оси x^* , был острым. Связь между ортами \vec{i}^* , \vec{j}^* , \vec{k}^* системы $x^* y^* z^*$ и ортами $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ определяется углами Эйлера θ, ψ, φ^* (рис. 2). Угол собственного вращения φ^* является циклической координатой.

Вектор \overline{MC} расположен в плоскости $Z' C z^*$

$$\vec{r}_{MC} = \frac{a\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta \sin \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \vec{e}_1 - \frac{a\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta \cos \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \vec{e}_2 + a \vec{e}_3 \sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

где a – длина большой полуоси эллипсоида; ε – эксцентриситет.

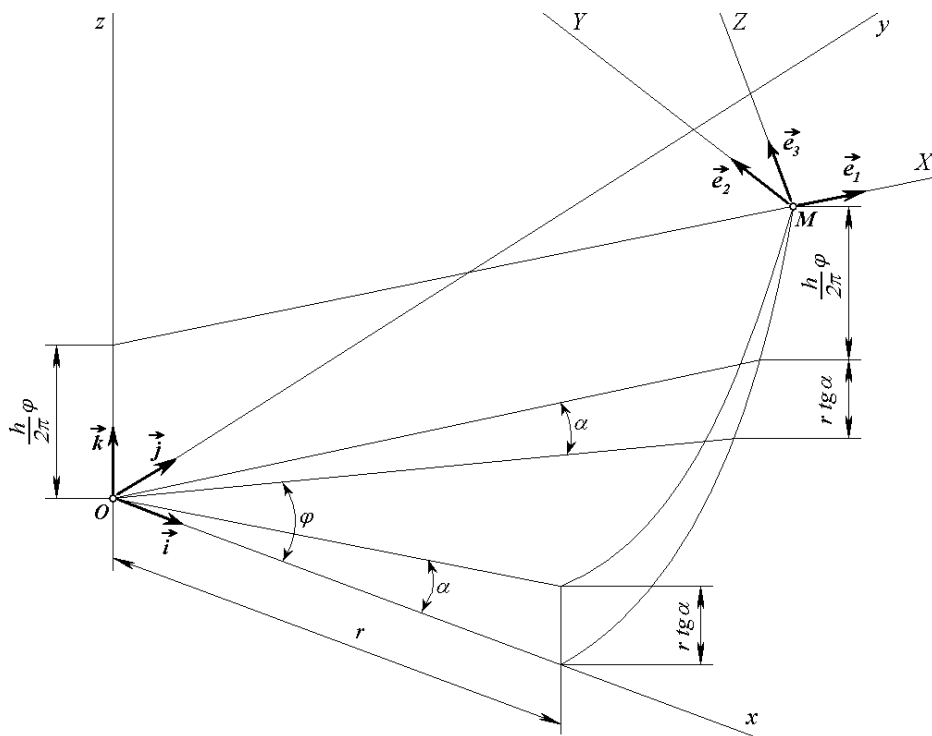


Рис. 1. Положение точки контакта относительно неподвижных координат

Определим радиус – вектор \vec{r}_C в разложении по ортам инерциальной системы координатах $x y z$

$$\begin{aligned}
 x_C &= \frac{h}{2\pi} \cos \alpha \cos \varphi \operatorname{ctg} \nu + \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) + \\
 &+ \frac{a\varepsilon^2}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \left\{ \sin \theta \cos \theta [\cos \alpha \cos \varphi \sin \psi + \cos \psi (\sin \varphi \cos \nu + \right. \\
 &+ \left. \sin \alpha \cos \varphi \sin \nu)] - \sin^2 \theta (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) \right\}, \\
 y_C &= \frac{h}{2\pi} \cos \alpha \sin \varphi \operatorname{ctg} \nu - a (\cos \varphi \sin \nu + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) \sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta} + \\
 &+ \frac{a\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} [\cos \alpha \sin \varphi \sin \psi - \cos \psi (\cos \varphi \cos \nu - \sin \alpha \sin \varphi \sin \nu)], \\
 z_C &= \frac{h}{2\pi} (\varphi + \sin \alpha \operatorname{ctg} \nu) + a \cos \alpha \cos \nu \sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta} + \\
 &+ \frac{a\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} (\sin \alpha \sin \psi - \cos \alpha \cos \psi \sin \nu). \tag{3}
 \end{aligned}$$

Дифференцируя по времени выражения (3), найдем составляющие вектора скорости и вектора ускорения центра масс эллипсоида, точки C

$$\left. \begin{aligned}
 V_{C_x} &= a\tilde{V}_{C_x} = a\tilde{A}_x_\varphi \dot{\varphi} + a\tilde{A}_x_\nu \dot{\nu} + a\tilde{A}_x_\theta \dot{\theta} + a\tilde{A}_x_\psi \dot{\psi}, \\
 V_{C_y} &= a\tilde{V}_{C_y} = a\tilde{A}_y_\varphi \dot{\varphi} + a\tilde{A}_y_\nu \dot{\nu} + a\tilde{A}_y_\theta \dot{\theta} + a\tilde{A}_y_\psi \dot{\psi}, \\
 V_{C_z} &= a\tilde{V}_{C_z} = a\tilde{A}_z_\varphi \dot{\varphi} + a\tilde{A}_z_\nu \dot{\nu} + a\tilde{A}_z_\theta \dot{\theta} + a\tilde{A}_z_\psi \dot{\psi},
 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

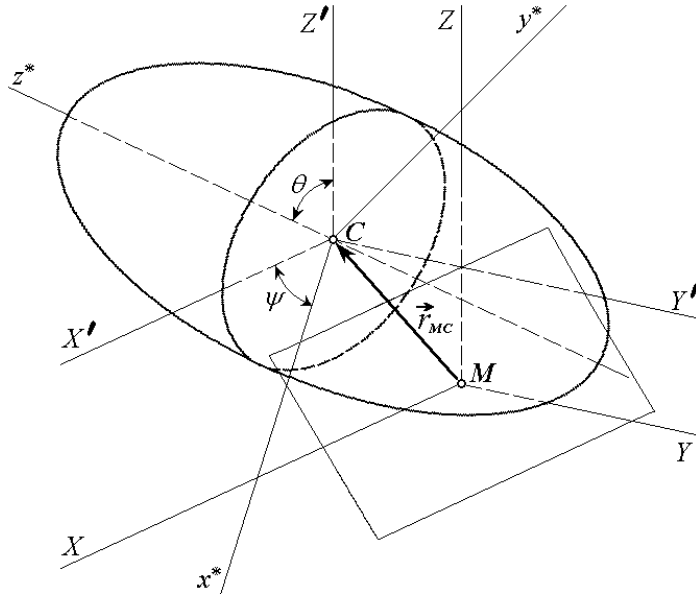


Рис. 2. Положение эллипсоида на поверхности геликоида

где коэффициенты при $\dot{\varphi}, \dot{\nu}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ определяются по формулам

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{x_{\varphi}} = & -\frac{h}{2\pi a} \cos \alpha \sin \varphi \operatorname{ctg} \nu + \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \left((1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta) (\cos \varphi \sin \nu + \right. \\ & \left. + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) - \varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta [\cos \alpha \sin \varphi \sin \psi - \cos \psi (\cos \varphi \cos \nu - \right. \\ & \left. - \cos \alpha \sin \varphi \sin \nu)] \right), \tilde{A}_{x_{\nu}}, \tilde{A}_{x_{\theta}}, \tilde{A}_{x_{\psi}}, \tilde{A}_{y_{\varphi}}, \tilde{A}_{y_{\nu}}, \tilde{A}_{y_{\theta}}, \tilde{A}_{y_{\psi}}, \tilde{A}_{z_{\varphi}}, \\ & \tilde{A}_{z_{\nu}}, \tilde{A}_{z_{\theta}}, \tilde{A}_{z_{\psi}} = \frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} (\sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \nu \sin \psi). \end{aligned} \quad (5)$$

Составляющие вектора ускорения центра масс эллипсоида

$$\left. \begin{aligned} a_{C_x} = \dot{V}_{C_x} = & a\tilde{A}_{x_{\varphi}} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{x_{\nu}} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{x_{\theta}} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{x_{\psi}} \ddot{\psi} + \\ & + \dot{a}\tilde{A}_{x_{\varphi}} \dot{\varphi} + \dot{a}\tilde{A}_{x_{\nu}} \dot{\nu} + \dot{a}\tilde{A}_{x_{\theta}} \dot{\theta} + \dot{a}\tilde{A}_{x_{\psi}} \dot{\psi}, \\ a_{C_y} = \dot{V}_{C_y} = & a\tilde{A}_{y_{\varphi}} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{y_{\nu}} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{y_{\theta}} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{y_{\psi}} \ddot{\psi} + \\ & + \dot{a}\tilde{A}_{y_{\varphi}} \dot{\varphi} + \dot{a}\tilde{A}_{y_{\nu}} \dot{\nu} + \dot{a}\tilde{A}_{y_{\theta}} \dot{\theta} + \dot{a}\tilde{A}_{y_{\psi}} \dot{\psi}, \\ a_{C_z} = \dot{V}_{C_z} = & a\tilde{A}_{z_{\varphi}} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{z_{\nu}} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{z_{\theta}} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{z_{\psi}} \ddot{\psi} + \\ & + \dot{a}\tilde{A}_{z_{\varphi}} \dot{\varphi} + \dot{a}\tilde{A}_{z_{\nu}} \dot{\nu} + \dot{a}\tilde{A}_{z_{\theta}} \dot{\theta} + \dot{a}\tilde{A}_{z_{\psi}} \dot{\psi}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Дифференцируем выражения (5), подставляем в равенства (6) и получаем составляющие вектора ускорения центра масс эллипсоида в инерциальной системе координат $x y z$

$$\begin{aligned} a_{C_x} = & a\tilde{A}_{x_{\varphi}} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{x_{\nu}} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{x_{\theta}} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{x_{\psi}} \ddot{\psi} + a\tilde{A}_{x_{\theta\theta}} \dot{\theta}^2 + a\tilde{A}_{x_{\varphi\varphi}} \dot{\varphi}^2 + \\ & + a\tilde{A}_{x_{\nu\nu}} \dot{\nu}^2 + a\tilde{A}_{x_{\psi\psi}} \dot{\psi}^2 + a\tilde{A}_{x_{\theta\varphi}} \dot{\theta} \dot{\varphi} + a\tilde{A}_{x_{\theta\nu}} \dot{\theta} \dot{\nu} + a\tilde{A}_{x_{\theta\psi}} \dot{\theta} \dot{\psi} + \\ & + a\tilde{A}_{x_{\nu\varphi}} \dot{\nu} \dot{\varphi} + a\tilde{A}_{x_{\varphi\psi}} \dot{\varphi} \dot{\psi} + a\tilde{A}_{x_{\nu\psi}} \dot{\nu} \dot{\psi}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{C_y} &= a\tilde{A}_{y_\varphi} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{y_\nu} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{y_\theta} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{y_\psi} \ddot{\psi} + a\tilde{A}_{y_{\theta\theta}} \dot{\theta}^2 + a\tilde{A}_{y_{\varphi\varphi}} \dot{\varphi}^2 + \\
&+ a\tilde{A}_{y_{\nu\nu}} \dot{\nu}^2 + a\tilde{A}_{y_{\psi\psi}} \dot{\psi}^2 + a\tilde{A}_{y_{\theta\varphi}} \dot{\theta}\dot{\varphi} + a\tilde{A}_{y_{\theta\nu}} \dot{\theta}\dot{\nu} + a\tilde{A}_{y_{\theta\psi}} \dot{\theta}\dot{\psi} + \\
&+ a\tilde{A}_{y_{\nu\varphi}} \dot{\nu}\dot{\varphi} + a\tilde{A}_{y_{\varphi\psi}} \dot{\varphi}\dot{\psi} + a\tilde{A}_{y_{\nu\psi}} \dot{\nu}\dot{\psi}, \\
a_{C_z} &= a\tilde{A}_{z_\varphi} \ddot{\varphi} + a\tilde{A}_{z_\nu} \ddot{\nu} + a\tilde{A}_{z_\theta} \ddot{\theta} + a\tilde{A}_{z_\psi} \ddot{\psi} + a\tilde{A}_{z_{\theta\theta}} \dot{\theta}^2 + a\tilde{A}_{z_{\varphi\varphi}} \dot{\varphi}^2 + \\
&+ a\tilde{A}_{z_{\nu\nu}} \dot{\nu}^2 + a\tilde{A}_{z_{\psi\psi}} \dot{\psi}^2 + a\tilde{A}_{z_{\theta\varphi}} \dot{\theta}\dot{\varphi} + a\tilde{A}_{z_{\theta\nu}} \dot{\theta}\dot{\nu} + a\tilde{A}_{z_{\theta\psi}} \dot{\theta}\dot{\psi} + \\
&+ a\tilde{A}_{z_{\nu\varphi}} \dot{\nu}\dot{\varphi} + a\tilde{A}_{z_{\varphi\psi}} \dot{\varphi}\dot{\psi} + a\tilde{A}_{z_{\nu\psi}} \dot{\nu}\dot{\psi}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Коэффициенты слагаемых в формулах (7) при произведениях первых производных

$$\begin{aligned}
\tilde{A}_{x_{\theta\theta}} &= -\frac{\varepsilon^2}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \left\{ \sin 2\theta \left(2 - \frac{3}{2} \frac{\varepsilon^2 \cos 2\theta}{(1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta)} - \frac{3}{8} \frac{\varepsilon^4 \sin^2 2\theta}{(1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta)^2} \right) \times \right. \\
&\times [\cos \alpha \cos \varphi \sin \psi + \cos \psi (\sin \varphi \cos \nu + \sin \alpha \cos \varphi \sin \nu)] + \\
&\left. \left(\cos 2\theta + \frac{\varepsilon^2 \sin^2 2\theta}{4(1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta)} \right) (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) \right\}, \\
&\tilde{A}_{x_{\varphi\varphi}}, \tilde{A}_{x_{\nu\nu}}, \tilde{A}_{x_{\psi\psi}}, \tilde{A}_{x_{\varphi\theta}}, \tilde{A}_{x_{\theta\nu}}, \tilde{A}_{x_{\theta\psi}}, \tilde{A}_{x_{\varphi\nu}}, \tilde{A}_{x_{\varphi\psi}}, \tilde{A}_{x_{\nu\psi}}, \\
&\tilde{A}_{y_{\theta\theta}}, \tilde{A}_{y_{\theta\varphi}}, \tilde{A}_{y_{\theta\nu}}, \tilde{A}_{y_{\theta\psi}}, \tilde{A}_{y_{\varphi\varphi}}, \tilde{A}_{y_{\nu\nu}}, \tilde{A}_{y_{\psi\psi}}, \tilde{A}_{y_{\varphi\theta}}, \tilde{A}_{y_{\theta\nu}}, \tilde{A}_{y_{\theta\psi}}, \tilde{A}_{y_{\varphi\nu}}, \\
&\tilde{A}_{y_{\varphi\psi}}, \tilde{A}_{y_{\nu\psi}}, \tilde{A}_{z_{\theta\theta}}, \tilde{A}_{z_{\varphi\varphi}}, \tilde{A}_{z_{\nu\nu}}, \tilde{A}_{z_{\psi\psi}}, \tilde{A}_{z_{\theta\nu}}, \tilde{A}_{z_{\theta\psi}}, \\
\tilde{A}_{z_{\nu\psi}} &= \frac{2 \varepsilon^2 \cos \alpha \sin \theta \cos \theta \sin \psi \cos \nu}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Вектор абсолютной угловой скорости $\vec{\omega}$ эллипсоида представим как сумму векторов угловых скоростей в переносном $\vec{\omega}_e$ и относительном $\vec{\omega}_r$ движениях. Найдем представление вектора $\vec{\omega}$ через производные обобщенных координат $\dot{\varphi}, \dot{\nu}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*$ в виде разложения по осям $x^* y^* z^*$

$$\begin{aligned}
\omega_{x^*} &= \dot{\varphi} (\sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \psi \sin \nu) + \dot{\nu} \cos \psi + \dot{\theta}, \\
\omega_{y^*} &= \dot{\varphi} (\cos \alpha \cos \nu \sin \theta + \cos \alpha \sin \nu \cos \theta \cos \psi - \sin \alpha \cos \theta \sin \psi) - \\
&- \dot{\nu} \cos \theta \sin \psi + \dot{\psi} \sin \theta, \\
\omega_{z^*} &= \dot{\varphi} (\sin \alpha \sin \theta \sin \psi - \cos \alpha \sin \theta \cos \psi \sin \nu + \cos \alpha \cos \theta \cos \nu) + \\
&+ \dot{\nu} \sin \theta \sin \psi + \dot{\psi} \cos \theta + \dot{\varphi}^*.
\end{aligned} \tag{9}$$

Воспользуемся теоремой Бура для определения вектора углового ускорения в разложении по осям $x^* y^* z^*$

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d \vec{\omega}}{d t} = \vec{i}^* \frac{d \omega_{x^*}}{d t} + \vec{j}^* \frac{d \omega_{y^*}}{d t} + \vec{k}^* \frac{d \omega_{z^*}}{d t},$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{x^*} &= \ddot{\varphi} (\sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \psi \sin \nu) + \ddot{\nu} \cos \psi + \ddot{\theta} + \\
&+ \dot{\varphi} \dot{\psi} (\cos \alpha \sin \nu \cos \psi - \sin \alpha \sin \psi) + \dot{\varphi} \dot{\nu} \cos \alpha \sin \psi \cos \nu - \dot{\nu} \dot{\psi} \sin \psi, \\
\varepsilon_{y^*} &= \ddot{\varphi} (\cos \alpha \cos \nu \sin \theta + \cos \alpha \sin \nu \cos \theta \cos \psi - \sin \alpha \cos \theta \sin \psi) - \ddot{\nu} \cos \theta \times \\
&\times \sin \psi + \ddot{\psi} \sin \theta + \dot{\varphi} \dot{\theta} (\cos \alpha \cos \nu \cos \theta - \cos \alpha \sin \nu \sin \theta \cos \psi + \sin \alpha \sin \theta \sin \psi) + \\
&+ \dot{\varphi} \dot{\nu} (\cos \alpha \cos \theta \cos \nu \cos \psi - \cos \alpha \sin \nu \sin \theta) - \dot{\varphi} \dot{\psi} (\cos \alpha \cos \theta \sin \psi \sin \nu + \\
&+ \sin \alpha \cos \theta \cos \psi) + \dot{\nu} \dot{\theta} \sin \theta \sin \psi - \dot{\nu} \dot{\psi} \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta, \\
\varepsilon_{z^*} &= \ddot{\varphi} (\sin \alpha \sin \theta \sin \psi - \cos \alpha \sin \nu \sin \theta \cos \psi + \cos \alpha \cos \theta \cos \nu) + \ddot{\nu} \sin \theta \sin \psi + \\
&+ \ddot{\psi} \cos \theta + \ddot{\varphi}^* + \dot{\varphi} \dot{\theta} (\sin \alpha \cos \theta \sin \psi - \cos \alpha \sin \nu \cos \theta \cos \psi - \cos \alpha \sin \theta \cos \nu) - \\
&+ \dot{\varphi} \dot{\nu} (\cos \alpha \sin \theta \cos \nu \cos \psi + \cos \alpha \sin \nu \cos \theta) + \dot{\varphi} \dot{\psi} (\sin \alpha \sin \theta \cos \psi + \\
&+ \cos \alpha \sin \theta \sin \psi \sin \nu) + \dot{\nu} \dot{\theta} \cos \theta \sin \psi + \dot{\nu} \dot{\psi} \sin \theta \cos \psi - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta.
\end{aligned} \tag{10}$$

Найдем скорость центра масс эллипсоида

$$\vec{V}_C = \vec{\omega} \times \vec{r}_{MC} = \vec{e}_1 V_{C_X} + \vec{e}_2 V_{C_Y} + \vec{e}_3 V_{C_Z}, \tag{11}$$

Вектор абсолютной угловой скорости эллипсоида

$$\begin{aligned}
\vec{\omega} &= \vec{e}_1 (\dot{\nu} + \dot{\varphi} \sin \alpha + \dot{\theta} \cos \psi + \dot{\varphi}^* \sin \psi \sin \theta) + \\
&+ \vec{e}_2 (\dot{\varphi} \cos \alpha \sin \nu + \dot{\theta} \sin \psi - \dot{\varphi}^* \cos \psi \sin \theta) + \vec{e}_3 (\dot{\varphi} \cos \alpha \cos \nu + \dot{\psi} + \dot{\varphi}^* \cos \theta).
\end{aligned} \tag{12}$$

Получим:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{1}{a} V_{C_X} &= \tilde{B}_{X_\varphi} \dot{\varphi} + \tilde{B}_{X_\theta} \dot{\theta} + \tilde{B}_{X_\psi} \dot{\psi} + \tilde{B}_{X_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^*, \\
\frac{1}{a} V_{C_Y} &= \tilde{B}_{Y_\varphi} \dot{\varphi} + \tilde{B}_{Y_\theta} \dot{\theta} + \tilde{B}_{Y_\psi} \dot{\psi} + \tilde{B}_{Y_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^*, \\
\frac{1}{a} V_{C_Z} &= \tilde{B}_{Z_\varphi} \dot{\varphi} + \tilde{B}_{Z_\theta} \dot{\theta} + \tilde{B}_{Z_\psi} \dot{\psi} + \tilde{B}_{Z_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^*.
\end{aligned} \right\} \tag{13}$$

Коэффициенты при $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, $\dot{\varphi}^*$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
\tilde{B}_{X_\varphi} &= \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \left[\cos \alpha \sin \nu (1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta) + \varepsilon^2 \cos \alpha \sin \theta \cos \theta \cos \psi \cos \nu \right], \\
\tilde{B}_{X_\theta} &= \sin \psi \sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}, \quad \tilde{B}_{X_\psi} = \frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta \cos \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \\
\tilde{B}_{X_{\varphi^*}} &= -\frac{(1-\varepsilon^2) \sin \theta \cos \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \quad \tilde{B}_{Y_\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \left[\varepsilon^2 \cos \alpha \sin \theta \cos \theta \sin \psi \cos \nu - \right. \\
&\left. - \sin \alpha (1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta) \right], \quad \tilde{B}_{Y_\theta} = -\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}, \quad \tilde{B}_{Y_\psi} = -\cos \psi \sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}, \\
\tilde{B}_{Z_\varphi} &= -\frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta (\sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \nu \sin \psi)}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \\
\tilde{B}_{Y_\psi} &= \frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta \sin \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \quad \tilde{B}_{Y_{\varphi^*}} = -\frac{(1-\varepsilon^2) \sin \theta \sin \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \\
\tilde{B}_{Z_\nu} &= -\frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta \cos \psi}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}, \quad \tilde{B}_{Z_\theta} = -\frac{\varepsilon^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2 \theta}}.
\end{aligned} \tag{14}$$

Скорости (4) и (12) тождественно равны. Формулы (4) приведем к ортам $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ и приравняем выражения при одинаковых ортах в (4) и (12), получим уравнения неголономных связей

$$\begin{aligned} & \left(\tilde{B}_{X_\varphi} - \cos \alpha \cos \varphi \tilde{A}_{Y_\varphi} - \sin \alpha \tilde{A}_{Z_\varphi} \right) \dot{\varphi} - \left(\cos \alpha \cos \varphi \tilde{A}_{X_\nu} + \cos \alpha \sin \varphi \tilde{A}_{Y_\nu} + \right. \\ & \left. + \sin \alpha \tilde{A}_{Z_\nu} \right) \dot{\nu} + \left(\tilde{B}_{X_\theta} - \cos \alpha \cos \varphi \tilde{A}_{X_\theta} + \cos \alpha \sin \varphi \tilde{A}_{Y_\theta} - \sin \alpha \tilde{A}_{Z_\theta} \right) \dot{\theta} + \\ & \left. + \left(\tilde{B}_{X_\psi} - \cos \alpha \cos \varphi \tilde{A}_{X_\psi} - \cos \alpha \sin \varphi \tilde{A}_{Y_\psi} - \sin \alpha \tilde{A}_{Z_\psi} \right) \dot{\psi} + \tilde{B}_{X_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^* = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \left[\tilde{B}_{Z_\varphi} - (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{X_\varphi} + (\cos \varphi \sin \nu + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{Y_\varphi} - \right. \\ & \left. - \cos \alpha \cos \nu \tilde{A}_{Z_\varphi} \right] \dot{\varphi} + \left[\tilde{B}_{Z_\nu} - (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{X_\nu} + (\cos \varphi \sin \nu + \right. \\ & \left. + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{Y_\nu} - \cos \alpha \cos \nu \tilde{A}_{Z_\nu} \right] \dot{\nu} + \left[\tilde{B}_{Z_\theta} - (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) \right. \\ & \left. \times \tilde{A}_{X_\theta} + (\cos \varphi \sin \nu + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{Y_\theta} + \cos \alpha \cos \nu \tilde{A}_{Z_\theta} \right] \dot{\theta} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

За независимые обобщенные координаты примем углы Эйлера. Дифференцируем равенства (15) и (16) по времени. Вторые производные углов $\ddot{\varphi}, \ddot{\nu}$ выразим через $\dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*$

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} = & \frac{1}{C_1 D_2 - C_2 D_1} \left\{ (C_3 D_2 - C_2 D_3) \ddot{\theta} + (C_4 D_2 - C_2 D_4) \ddot{\psi} + (C_5 D_2) \ddot{\varphi}^* + \right. \\ & + (C_6 D_2 - C_2 D_6) \dot{\varphi}^2 + (C_7 D_2 - C_2 D_7) \dot{\nu}^2 + (C_8 D_2 - C_2 D_8) \dot{\theta}^2 + \\ & + (C_9 D_2 - C_2 D_9) \dot{\psi}^2 + (C_{10} D_2 - C_2 D_{10}) \dot{\varphi} \dot{\nu} + (C_{11} D_2 - C_2 D_{11}) \dot{\varphi} \dot{\theta} + \\ & + (C_{12} D_2 - C_2 D_{12}) \dot{\varphi} \dot{\psi} + (C_{13} D_2 - C_2 D_{13}) \dot{\nu} \dot{\theta} + (C_{14} D_2 - C_2 D_{14}) \dot{\nu} \dot{\psi} + \\ & \left. + (C_{15} D_2 - C_2 D_{15}) \dot{\theta} \dot{\psi} + (C_{16} D_2) \dot{\theta} \dot{\varphi}^* + (C_{17} D_2) \dot{\psi} \dot{\varphi}^* \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\nu} = & \frac{1}{C_1 D_2 - C_2 D_1} \left\{ (C_1 D_3 - C_3 D_1) \ddot{\theta} + (C_1 D_4 - C_4 D_1) \ddot{\psi} - (C_5 D_1) \ddot{\varphi}^* + \right. \\ & + (C_1 D_6 - C_6 D_1) \dot{\varphi}^2 + (C_1 D_7 - C_7 D_1) \dot{\nu}^2 + (C_1 D_8 - C_8 D_1) \dot{\theta}^2 + \\ & + (C_1 D_9 - C_9 D_1) \dot{\psi}^2 + (C_1 D_{10} - C_{10} D_1) \dot{\varphi} \dot{\nu} + (C_1 D_{11} - C_{11} D_1) \dot{\varphi} \dot{\theta} + \\ & + (C_1 D_{12} - C_{12} D_1) \dot{\varphi} \dot{\psi} + (C_1 D_{13} - C_{13} D_1) \dot{\nu} \dot{\theta} + (C_1 D_{14} - C_{14} D_1) \dot{\nu} \dot{\psi} + \\ & \left. + (C_1 D_{15} - C_{15} D_1) \dot{\theta} \dot{\psi} - (C_{16} D_1) \dot{\theta} \dot{\varphi}^* - (C_{17} D_1) \dot{\psi} \dot{\varphi}^* \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициенты C_i, D_j в (17) и (18) определяются по формулам

$$\begin{aligned} C_1 = & -\cos \alpha \cos \varphi \tilde{A}_{X_\varphi} - \cos \alpha \sin \varphi \tilde{A}_{Y_\varphi} - \sin \alpha \tilde{A}_{Z_\varphi} + \tilde{B}_{X_\varphi}, \dots, C_{17} = -\tilde{B}_{X_{\varphi^* \psi}}; \\ D_1 = & \tilde{B}_{Z_\varphi} - (\sin \varphi \sin \nu - \cos \alpha \cos \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{X_\varphi} + (\cos \varphi \sin \nu + \\ & + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) \tilde{A}_{Y_\varphi} - \cos \alpha \sin \nu \tilde{A}_{Z_\varphi}, \dots, \\ D_{15} = & (\sin \varphi \sin \nu - \sin \alpha \cos \varphi \cos \nu) (\tilde{A}_{X_{\theta \psi}} + \tilde{A}_{X_{\psi \theta}}) - (\cos \varphi \sin \nu + \\ & + \sin \alpha \sin \varphi \cos \nu) (\tilde{A}_{Y_{\theta \psi}} + \tilde{A}_{Y_{\psi \theta}}) + \cos \alpha \cos \nu (\tilde{A}_{Z_{\theta \psi}} + \tilde{A}_{Z_{\psi \theta}}). \end{aligned} \quad (19)$$

В уравнениях (7) и (11) заменим $\ddot{\varphi}, \ddot{\nu}$ согласно формулам (17) – (19). Коэффициенты $\tilde{B}_{X_{\theta \theta}}, \tilde{B}_{X_{\psi \psi}}, \tilde{B}_{X_{\varphi \nu}}, \tilde{B}_{X_{\varphi \theta}}, \tilde{B}_{X_{\varphi \psi}}, \tilde{B}_{X_{\varphi^* \theta}}, \tilde{B}_{X_{\varphi^* \psi}}$ при $\dot{\theta}^2, \dot{\psi}^2, \dot{\varphi} \dot{\nu}, \dot{\varphi} \dot{\theta}, \dot{\varphi} \dot{\psi},$

$\dot{\varphi}^* \dot{\theta}^*$, $\dot{\varphi}^* \dot{\psi}^*$ определим, дифференцируя по времени выражения $\dot{\varphi} \dot{\tilde{B}}_{X_\varphi}$, $\dot{\theta} \dot{\tilde{B}}_{X_\theta}$, $\dot{\psi} \dot{\tilde{B}}_{X_\psi}$, $\dot{\varphi}^* \dot{\tilde{B}}_{X_{\varphi^*}}$,

Ускорение центра масс эллипсоида в проекциях на оси x , y , z

$$\begin{aligned} a_{x_C} &= a\tilde{a}_{x_C} = a(f_{x_1}\ddot{\theta} + f_{x_2}\ddot{\psi} + f_{x_3}\ddot{\varphi}^* + f_{x_4}\dot{\theta}^2 + f_{x_5}\dot{\varphi}^2 + f_{x_6}\dot{\psi}^2 + f_{x_7}\dot{\psi}^2 + \\ &+ f_{x_8}\dot{\varphi}\dot{\theta} + f_{x_9}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{x_{10}}\dot{\theta}\dot{\psi} + f_{x_{11}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{x_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{x_{13}}\dot{\psi}\dot{\psi} + f_{x_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + f_{x_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*), \\ a_{y_C} &= a\tilde{a}_{y_C} = a(f_{y_1}\ddot{\theta} + f_{y_2}\ddot{\psi} + f_{y_3}\ddot{\varphi}^* + f_{y_4}\dot{\theta}^2 + f_{y_5}\dot{\varphi}^2 + f_{y_6}\dot{\psi}^2 + f_{y_7}\dot{\psi}^2 + \\ &+ f_{y_8}\dot{\varphi}\dot{\theta} + f_{y_9}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{y_{10}}\dot{\theta}\dot{\psi} + f_{y_{11}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{y_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{y_{13}}\dot{\psi}\dot{\psi} + f_{y_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + f_{y_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*), \\ a_{z_C} &= a\tilde{a}_{z_C} = a(f_{z_1}\ddot{\theta} + f_{z_2}\ddot{\psi} + f_{z_3}\ddot{\varphi}^* + f_{z_4}\dot{\theta}^2 + f_{z_5}\dot{\varphi}^2 + f_{z_6}\dot{\psi}^2 + f_{z_7}\dot{\psi}^2 + \\ &+ f_{z_8}\dot{\varphi}\dot{\theta} + f_{z_9}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{z_{10}}\dot{\theta}\dot{\psi} + f_{z_{11}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{z_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + f_{z_{13}}\dot{\psi}\dot{\psi} + f_{z_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + f_{z_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*) \end{aligned} \quad (20)$$

Угловое ускорение в разложении по главным осям инерции эллипсоида

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x^*} &= \varepsilon_{x_1}\ddot{\theta} + \varepsilon_{x_2}\ddot{\psi} + \varepsilon_{x_3}\ddot{\varphi}^* + \varepsilon_{x_4}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{x_5}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{x_6}\dot{\psi}\dot{\psi} + \varepsilon_{x_7}\dot{\varphi}^2 + \varepsilon_{x_8}\dot{\psi}^2 + \\ &+ \varepsilon_{x_9}\dot{\theta}^2 + \varepsilon_{x_{10}}\dot{\psi}^2 + \varepsilon_{x_{11}}\dot{\varphi}\dot{\theta} + \varepsilon_{x_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{x_{13}}\dot{\theta}\dot{\psi} + \varepsilon_{x_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + \varepsilon_{x_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*, \\ \varepsilon_{y^*} &= \varepsilon_{y_1}\ddot{\theta} + \varepsilon_{y_2}\ddot{\psi} + \varepsilon_{y_3}\ddot{\varphi}^* + \varepsilon_{y_4}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{y_5}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{y_6}\dot{\psi}\dot{\psi} + \varepsilon_{y_7}\dot{\varphi}^2 + \varepsilon_{y_8}\dot{\psi}^2 + \\ &+ \varepsilon_{y_9}\dot{\theta}^2 + \varepsilon_{y_{10}}\dot{\psi}^2 + \varepsilon_{y_{11}}\dot{\varphi}\dot{\theta} + \varepsilon_{y_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{y_{13}}\dot{\theta}\dot{\psi} + \varepsilon_{y_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + \varepsilon_{y_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*, \\ \varepsilon_{z^*} &= \varepsilon_{z_1}\ddot{\theta} + \varepsilon_{z_2}\ddot{\psi} + \varepsilon_{z_3}\ddot{\varphi}^* + \varepsilon_{z_4}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{z_5}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{z_6}\dot{\psi}\dot{\psi} + \varepsilon_{z_7}\dot{\varphi}^2 + \varepsilon_{z_8}\dot{\psi}^2 + \\ &+ \varepsilon_{z_9}\dot{\theta}^2 + \varepsilon_{z_{10}}\dot{\psi}^2 + \varepsilon_{z_{11}}\dot{\varphi}\dot{\theta} + \varepsilon_{z_{12}}\dot{\varphi}\dot{\psi} + \varepsilon_{z_{13}}\dot{\theta}\dot{\psi} + \varepsilon_{z_{14}}\dot{\theta}\dot{\varphi}^* + \varepsilon_{z_{15}}\dot{\psi}\dot{\varphi}^*. \end{aligned} \quad (21)$$

Коэффициенты f_{x_i} , f_{y_i} , f_{z_i} , ε_{x_i} , ε_{y_i} , ε_{z_i} являются функции обобщенных координат и определяются после замены в уравнениях (7) и (11) значений по формулам (17) и (18).

Сумма поступательной $\Pi_{пост}$ и вращательной $\Pi_{вр}$ энергии представляет энергию ускорений Π [11]

$$\Pi_{пост} = \frac{1}{2}(ma_{x_C}^2 + ma_{y_C}^2 + ma_{z_C}^2), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{вр} &= \frac{1}{2}(J_{x^*}\varepsilon_{x^*}^2 + J_{y^*}\varepsilon_{y^*}^2 + J_{z^*}\varepsilon_{z^*}^2) + (J_{z^*} - J_{x^*})\varepsilon_{x^*}\omega_{z^*}\omega_{y^*} + \\ &(J_{x^*} - J_{z^*})\varepsilon_{y^*}\omega_{x^*}\omega_{z^*} + (J_{y^*} - J_{x^*})\varepsilon_{z^*}\omega_{y^*}\omega_{x^*} + \Pi_{вр}^*, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\Pi_{вр}^*$ – часть энергии ускорений не зависящая от угловых ускорений.

Для эллипсоида вращения с большой осью $2a$ и эксцентриситетом ε главные центральные моменты инерции определяются по формулам

$$J_{x^*} = J_{y^*} = \frac{2}{5}ma^2\left(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}\right), \quad J_{z^*} = \frac{2}{5}ma^2(1 - \varepsilon^2), \quad J_{x^*} - J_{z^*} = \frac{ma^2\varepsilon^2}{5}. \quad (24)$$

Подставим значения (24) в равенство (23)

$$\begin{aligned} \Pi_{вр} &= \frac{ma^2}{5}\left(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}\right)(\varepsilon_{x^*}^2 + \varepsilon_{y^*}^2) + \frac{ma^2}{5}(1 - \varepsilon^2)\varepsilon_{z^*}^2 + \frac{ma^2\varepsilon^2}{5}\omega_{z^*} \times \\ &\times (\varepsilon_{y^*}\omega_{x^*} - \varepsilon_{x^*}\omega_{y^*}) + \Pi_{вр}^*. \end{aligned} \quad (25)$$

Составим уравнения Аппеля

$$\frac{\partial (\Pi_{nocm} + \Pi_{ep})}{\partial \ddot{\theta}} = Q_{\theta}; \quad \frac{\partial (\Pi_{nocm} + \Pi_{ep})}{\partial \ddot{\psi}} = Q_{\psi}; \quad \frac{\partial (\Pi_{nocm} + \Pi_{ep})}{\partial \ddot{\varphi}^*} = Q_{\varphi^*}; \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & ma^2(f_{x_1} \tilde{a}_{x_C} + f_{y_1} \tilde{a}_{y_C} + f_{z_1} \tilde{a}_{z_C}) + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}\right) (\varepsilon_{x_1} \varepsilon_{x^*} + \varepsilon_{y_1} \varepsilon_{y^*}) + \\ & + \frac{2}{5} (1 - \varepsilon^2) \varepsilon_{z_1} \varepsilon_{z^*} + \varepsilon^2 / 5 \omega_{z^*} (\varepsilon_{y_1} \omega_{x^*} - \varepsilon_{x_1} \omega_{y^*}) \Big\} = Q_{\theta}; \\ & ma^2(f_{x_2} \tilde{a}_{x_C} + f_{y_2} \tilde{a}_{y_C} + f_{z_2} \tilde{a}_{z_C}) + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}\right) (\varepsilon_{x_2} \varepsilon_{x^*} + \varepsilon_{y_2} \varepsilon_{y^*}) + \\ & + \frac{2}{5} (1 - \varepsilon^2) \varepsilon_{z_2} \varepsilon_{z^*} + \varepsilon^2 / 5 \omega_{z^*} (\varepsilon_{y_2} \omega_{x^*} - \varepsilon_{x_2} \omega_{y^*}) \Big\} = Q_{\psi}; \\ & ma^2(f_{x_3} \tilde{a}_{x_C} + f_{y_3} \tilde{a}_{y_C} + f_{z_3} \tilde{a}_{z_C}) + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}\right) (\varepsilon_{x_3} \varepsilon_{x^*} + \varepsilon_{y_3} \varepsilon_{y^*}) + \\ & + \frac{2}{5} (1 - \varepsilon^2) \varepsilon_{z_3} \varepsilon_{z^*} + \varepsilon^2 / 5 \omega_{z^*} (\varepsilon_{y_3} \omega_{x^*} - \varepsilon_{x_3} \omega_{y^*}) \Big\} = Q_{\varphi^*}. \end{aligned} \quad (27)$$

Коэффициенты $f_{x_1}, f_{x_2}, f_{x_3}, f_{y_1}, f_{y_2}, f_{y_3}, f_{z_1}, f_{z_2}, f_{z_3}$, ускорения $a_{x_C}, a_{y_C}, a_{z_C}$ определяются из (20), угловые скорости $\omega_{x^*}, \omega_{y^*}, \omega_{z^*}$ формулами (9), коэффициенты $\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \varepsilon_{x_3}, \varepsilon_{y_1}, \varepsilon_{y_2}, \varepsilon_{y_3}, \varepsilon_{z_1}, \varepsilon_{z_2}, \varepsilon_{z_3}$ и угловые ускорения $\varepsilon_{x^*}, \varepsilon_{y^*}, \varepsilon_{z^*}$ по формулам (21)

В уравнениях (4) заменим $\dot{\varphi}, \dot{\nu}$ через $\dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*$ по формулам (17), (18), найдем составляющие вектора скорости центра масс эллипсоида по осям X, Y, Z и введем квази-координаты. Определим обобщенные силы

$$\left. \begin{aligned} V_{C_X} &= a \left(d_{X_{\theta}} \dot{\theta} + d_{X_{\psi}} \dot{\psi} + d_{X_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^* \right) = a \dot{\pi}_1, \\ V_{C_Y} &= a \left(d_{Y_{\theta}} \dot{\theta} + d_{Y_{\psi}} \dot{\psi} + d_{Y_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^* \right) = a \dot{\pi}_2, \\ V_{C_Z} &= a \left(d_{Z_{\theta}} \dot{\theta} + d_{Z_{\psi}} \dot{\psi} + d_{Z_{\varphi^*}} \dot{\varphi}^* \right) = a \dot{\pi}_3, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где коэффициенты при $\dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*$ известные функции координат.

Уравнения Аппеля запишем в квазикоординатах

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\pi}_1} = Q_{\pi_1}, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\pi}_2} = Q_{\pi_2}, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\pi}_3} = Q_{\pi_3}. \quad (29)$$

Определим обобщенные силы соответствующие квазикоординатам.

Из выражений (28) следует

$$\delta S_{C_X} = a \delta \pi_1, \quad \delta S_{C_Y} = a \delta \pi_2, \quad \delta S_{C_Z} = a \delta \pi_3. \quad (30)$$

Работа силы тяжести на возможных перемещениях системы

$$\begin{aligned} \delta A &= -(mg \sin \alpha) \delta S_{C_X} - (mg \cos \alpha \sin \nu) \delta S_{C_Y} - (mg \cos \alpha \cos \nu) \delta S_{C_Z} = \\ &= -(mga \sin \alpha) \delta \pi_1 - (mga \cos \alpha \sin \nu) \delta \pi_2 - (mga \cos \alpha \cos \nu) \delta \pi_3. \end{aligned} \quad (31)$$

Коэффициенты при вариациях обобщенных координат являются обобщенными силами. Получим

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \ddot{\pi}_1} = -m g a \sin \alpha, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \ddot{\pi}_2} = -m g a \cos \alpha \sin \nu, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \ddot{\pi}_3} = -m g a \cos \alpha \cos \nu. \quad (32)$$

Дифференцируем по времени уравнения (28)

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\pi}_1 &= d_{X_\theta} \ddot{\theta} + d_{X_\psi} \ddot{\psi} + d_{X_{\varphi^*}} \ddot{\varphi}^* + f_1(\theta, \varphi, \psi, \nu, \varphi^*, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*), \\ \ddot{\pi}_2 &= d_{Y_\theta} \ddot{\theta} + d_{Y_\psi} \ddot{\psi} + d_{Y_{\varphi^*}} \ddot{\varphi}^* + f_2(\theta, \varphi, \psi, \nu, \varphi^*, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*), \\ \ddot{\pi}_3 &= d_{Z_\theta} \ddot{\theta} + d_{Z_\psi} \ddot{\psi} + d_{Z_{\varphi^*}} \ddot{\varphi}^* + f_3(\theta, \varphi, \psi, \nu, \varphi^*, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\varphi}^*). \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Полагаем $\Pi = ma^2 \tilde{\Pi}$ и с учетом значений (32), (33), получим систему уравнений Аппеля

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial \ddot{\theta}} &= -\frac{q}{a} (d_{X_\theta} \sin \alpha + d_{Y_\theta} \cos \alpha \sin \nu + d_{Z_\theta} \cos \alpha \cos \nu), \\ \frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial \ddot{\psi}} &= -\frac{q}{a} (d_{X_\psi} \sin \alpha + d_{Y_\psi} \cos \alpha \sin \nu + d_{Z_\psi} \cos \alpha \cos \nu), \\ \frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial \ddot{\varphi}^*} &= -\frac{q}{a} (d_{X_{\varphi^*}} \sin \alpha + d_{Y_{\varphi^*}} \cos \alpha \sin \nu + d_{Z_{\varphi^*}} \cos \alpha \cos \nu). \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Уравнения Аппеля (34) совместно с уравнениями неголономных связей (15), (16) описывают движение эллипсоида по абсолютно шероховатой винтовой поверхности под действием силы тяжести. Решение системы определяется для заданных начальных условий. Задавая расстояние r_0 точки контакта от оси геликоида, полагаем:

$$\varphi_0 = 0, \quad \nu_0 = \arctg\left(\frac{h \cos \alpha}{2\pi r_0}\right), \quad \psi = \psi_0, \quad \theta = \theta_0, \quad \varphi_o^* = 0.$$

Задаемся угловыми скоростями $\dot{\varphi}_o^*$, $\dot{\psi}_0$, $\dot{\theta}_0$. Из уравнений связей (15), (16) определяем $\dot{\varphi}_0$, $\dot{\nu}_0$.

Введем ограничения:

1. При качении эллипсоида по винтовой поверхности должен сохраняться одноточечный контакт. Для этого минимальная кривизна нормального сечения эллипсоида $K_{1_{\min}}$ должна быть больше максимальной кривизны поверхности геликоида $K_{2_{\max}}$

$$\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{a} > \frac{1}{2(EG-F^2)} [-(2MF-EN-LG)+\sqrt{D}], \quad (35)$$

где $D = (2MF-EN-LG)^2 - 4(EG-F^2)(LN-M^2)$; E, F, G, L, M, N – элементы первой и второй квадратичных форм Гаусса для геликоида.

2. Ось винтовой поверхности не должна пересекать поверхность эллипсоида

$$\operatorname{tg} \nu < \frac{h}{2\pi l}, \quad (36)$$

где l – расстояние между точкой контакта M и точкой пересечения образующей геликоида с осью, при ее соприкосновении с эллипсоидом.

Выводы

1. Получена система уравнений второго порядка линейная относительно вторых производных независимых координат ψ, θ, φ^* и представляющая квадратичную форму из производных $\dot{\varphi}, \dot{\nu}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}^*$. Система уравнений второго порядка рас-

считается совместно с уравнениями неголономных связей, представляющих линейные функции производных обобщенных координат $\dot{\varphi}, \dot{\nu}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}^*$.

2. Коэффициенты при производных являются функциями координат и ввиду сложности полученных выражений вычисляются последовательно.

3. Для отыскания обобщенных сил, целесообразно использовать уравнения Априля в квазикоординатах, а затем линейную связь между производными $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}^*$ и $\dot{\pi}_1, \dot{\pi}_2, \dot{\pi}_3$.

4. Начальные условия задаются для $\varphi_0 = 0, \nu_0, \psi_0, \theta_0, \varphi_0^* = 0, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}^*$, а значения $\dot{\varphi}_0, \dot{\nu}_0$ определяются из уравнений неголономных связей.

5. Параметры $\varphi, \nu, \psi, \theta, \varphi^*, \dot{\varphi}, \dot{\nu}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}^*$ целесообразно определять в интервале $\varphi = 0$ до $\varphi = 2\pi$. Затем продолжить расчет, приняв значения остальных параметров за начальные.

6. Систему уравнений второго порядка можно использовать и для других силовых систем, изменив при этом обобщенные силы.

Л и т е р а т у р а

1. Чаплыгин С. А. Исследования по динамике неголономных систем. М.: УРСС, 2007, 112 с.
2. Добронравов В. В. Основы механики неголономных систем. – М.: Высшая школа, 1970. – 272 с.
3. Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Динамика неголономных систем. М.: Наука, 1967. – 520 с.
4. Аппель П. Теоретическая механика. М.: Физматгиз, 1960. Т. 2. – 487 с.
5. Воронец П. В. К задаче о движении твердого тела, катящегося без скольжения по данной поверхности под действием данных сил. Киевские университетск. известия. – К.: 1910, т. 50, № 10. – с. 101 – 111.
6. Ценов И. Нови форми на общите уравнения на движението на Материалните Системи, Годишник Софийск. ун – та, Болгария, т. 45, кв. 1, 1949, с. 233 – 261.
7. Ценов И. Об одной новой форме уравнений аналитической динамики. ДАН СССР, т. 89, № 1, 1953.
8. Чаплыгин С. А. О катании шара по горизонтальной плоскости. Собр. Соч. М.:Л.: ГИТТЛ, 1948. Т. 1. С. 76 – 101.
9. Келдыш М. В. Шимми переднего колеса трехколесного шасси: Труды ЦАГИ. – 1945. - № 564.
10. Борисов А. В., Мамаев И. С. О движении шара Чаплыгина по наклонной плоскости. Докл. РАН, 2006, т. 406, № 5, с. 620 – 623.
11. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.

R e f e r e n c e s

1. Chaplygin S. A. Issledovaniya po dinamike negolonomnyh sistem. M.: URSS, 2007, 112 s.
2. Dobronravov V. V. Osnovy mehaniki negolonomnyh sistem. – M.: Vysshaja shkola, 1970. – 272 s.
3. Nejmark Ju. I., Fufaev N. A. Dinamika negolonomnyh sistem. M.: Nauka, 1967. – 520 s.
4. Appel' P. Teoreticheskaja mehanika. M.: Fizmatgiz, 1960. T. 2. – 487 s.
5. Voronec P. V. K zadache o dvizhenii tverdogo tela, katjajewegosja bez skol'zhenija po dannoj poverhnosti pod dejstviem dannyh sil. Kievskie universitetsk. izvestija. – K.: 1910, t. 50, № 10. – s. 101 – 111.
6. Cenov I. Novi formi na obwite uravnenija na dvizhenieto na Materialnite Sistemi, Godishnik Sofijsk. un – ta, Bolgarija, t. 45, kv. 1, 1949, s. 233 – 261.
7. Cenov I. Ob odnoj novoj forme uravnenij analiticheskoi dinamiki. DAN SSSR, t. 89, № 1, 1953.
8. Chaplygin S. A. O katanii shara po gorizontal'noj ploskosti. Sobr. Soch. M.:L.: GITTL, 1948. T. 1. S. 76 – 101.
9. Keldysh M. V. Shimmi perednego kolesa trehkolesnogo shassi: Trudy CAGI. – 1945. - № 564.
10. Borisov A. V., Mamaev I. S. O dvizhenii shara Chaplygina po naklonnoj ploskosti. Dokl. RAN, 2006, t. 406, № 5, s. 620 – 623.
11. Lur'e A. I. Analiticheskaja mehanika. M.: Fizmatgiz, 1961.

С.А. Гриднєв, В.Н. Стрельников

ЗАДАЧА КОЧЕННЯ ЕЛІПСОЇДА ПО ПОВЕРХНІ ГЕЛІКОЇДА

Отримана система диференціальних рівнянь, що описують кочення еліпсоїда по поверхні гелікоїда в полі сили ваги. Задача вирішена для неголономного зв'язку однокрапкового контакту ідеально шорсткуватих поверхонь. У якості узагальнених координат прийняті кутові величини, що описують положення крапки контакту, і кути Ейлера, що визначають положення еліпсоїда на гвинтовій поверхні. Обґрунтовані початкові й граничні умови.

Ключові слова: еліпсоїд, гелікоїд, поверхня, кривизна, утворююча поверхня.

S.A.Gridnev, V.N.Strelnikov

PROBLEM ROLLING ELLIPSOID IN SURFACES HELICOID

The system of the differential equations describing rolling ellipsoid on a surface helicoid in a field of a gravity is received. The problem is solved for communications of one-dot contact of ideally rough surfaces. As the generalized coordinates the angular sizes describing position of a point of contact, and Euler's determining position ellipsoid on a screw surface the corners are accepted. Initial and boundary conditions are proved.

Key words: ellipsoid, helicoid, a surface, the curvature forming.

С.А. Гриднєв – доцент, к.т.н., ПАО «НКМЗ» (г. Краматорск);

В.Н. Стрельников – д.т.н., ПАО «НКМЗ» (г. Краматорск).

Рецензент: **В.П. Шишов**, д.т.н., профессор кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 004.91

М. А. Крысанов, М. К. Дёмин, Г. Ю. Осенина

г. Луганск

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассмотрены особенности автоматизации процессов взаимоотношения с клиентами производственных предприятий на примере литейного производства. Основной целью внедрения систем управления взаимоотношениями с клиентами (CRM-систем) является оптимизация бизнес-процессов, направленных на привлечение новых клиентов и укрепление взаимоотношений с существующими. Рассмотрена специфика современных CRM-систем. На основе исследования функционирования отдела продаж литейного завода сформулированы требования к CRM-системе производственного предприятия, которая позволит повысить эффективность работы менеджеров по сбыту. Среди требований присутствуют: возможность ведения единой базы данных клиентов, формирование отчетов о результатах деятельности сотрудников отдела продаж, управление маркетингом, возможность доработки используемой системы с ориентацией на потребности компании, доступность и простота развертывания системы. В качестве основного специфического требования указана необходимость использования CRM-системой данных о нынешнем состоянии процесса производства, а также об объемах текущих и прогнозируемых складских запасов.

Ключевые слова: CRM-система, литейное производство, информационная система, менеджмент, отдел продаж.

Введение. С развитием рыночных отношений все больше стал возникать вопрос о сбыте продукции клиентам или организациям. Появляется все больше конкурентов на производство одного товара и, как следствие, у производителя уменьшается круг сбыта – количество покупателей. Чтобы увеличить свою конкурентоспособность на фоне остальных компаний используют механизмами реализации товара и услуг как единым

комплексным процессом или маркетингом. По одному из определений «Маркетинг — это искусство и наука правильно выбирать целевой рынок, привлекать, сохранять и наращивать количество потребителей посредством создания у покупателя уверенности, что он представляет собой наивысшую ценность для компании», а также «упорядоченный и целенаправленный процесс осознания проблем потребителей и регулирования рыночной деятельности» (Филипп Котлер) [1]. Но не всегда большая организация с огромным наименованием продукции и огромным количеством мелких сделок за месяц может полностью оценить эффективность своей маркетинговой системы. А иногда для обеспечения такой системы может понадобиться большое количество ресурсов и рабочей силы. Для более наглядной и более детальной оценки эффективности маркетинговых компаний необходимо обращаться к компьютерным технологиям. Компьютерная система CRM (Customer Relationship Management), что в переводе на русский язык «управление взаимоотношениями с клиентами», может помочь решить ряд возникших проблем связанных с нахождением и последующим удержанием клиента а также контролем эффективности отдела продаж.

Цель статьи - рассмотрение CRM системы как способа повышения эффективности отдела продаж для предприятия и способа контроля работы сотрудников, а также оценка возможности внедрения системы управления взаимоотношениями с клиентами в промышленную сферу на примере литейного производства, выявление, определение требований к такой системе.

Обзор литературы. Термин CRM может трактоваться по-разному: как метод ведения бизнеса, как метод контроля отдела менеджеров, как способ сохранения базы клиентов на фирме, или же как программное обеспечение для автоматизации методологии бизнеса. Не смотря на довольно большой диапазон возможных трактовок, все они верны.

Термин Customer Relationship Management можно перевести на русский язык как «управление взаимоотношениями с клиентами». Этот буквальный перевод вполне соответствует истине, но не рисует полной картины. Система управления взаимодействием с клиентами (CRM) — корпоративная информационная система, предназначенная для автоматизации CRM-стратегии компании, в частности, для повышения уровня продаж, оптимизации маркетинга и улучшения обслуживания клиентов путём сохранения информации о клиентах (контрагентах) и истории взаимоотношений с ними, установления и улучшения бизнес-процедур и последующего анализа результатов. Под термином «CRM-система» понимается программный продукт (ПО), направленный на реализацию концепции CRM.[2,3]

CRM — это стратегия.

По сути, CRM — это специфический подход к ведению бизнеса, при котором во главу угла деятельности компании ставится клиент. То есть, стратегия CRM предполагает создание в компании таких механизмов взаимодействия с клиентами, при которых их потребности обладают наивысшим приоритетом для предприятия. Подобная ориентированность на клиента затрагивает не только общую стратегию бизнеса компании, но и корпоративную культуру, структуру, бизнес-процессы, операции.[2]

Любой бизнес и любое предприятие в качестве основной цели для внедрения CRM-стратегии на производство видит создание конвейера по привлечению новых клиентов и развитию существующих клиентов. А также возможность и гарантия сохранения потенциальных клиентов у себя в базе данных и управлять взаимоотношениями.

Управлять взаимоотношениями означает привлекать новых клиентов, нейтральных покупателей превращать в лояльных клиентов, из постоянных клиентов формировать бизнес-партнеров. [2]

Учитывая специфику работы CRM можно выделить основные компоненты для такой системы, а именно:

- управление контактами и клиентской базой,
- управление продажами,
- продажи по телефону (телемаркетинг),

- управление временем (таймменеджмент),
- поддержка и обслуживание клиентов (горячая линия, послепродажный сервис),
- управление маркетингом (в т.ч. анкетированием, опросами и рассылками),
- отчетность для высшего руководства,
- интеграция с другими системами,
- синхронизация данных,
- управление электронной торговлей (интеграция с сайтом компании, портал для клиентов или партнеров),
- управление мобильными продажами (с КПК, ноутбука или удаленный доступ).

В то же время, важно осознавать, что автоматизация процесса взаимоотношений с клиентами является важным, но не единственным и не первостепенным шагом при построении клиентоориентированной компании. Программный продукт — это удобный инструмент, который станет поддержкой уже существующим регламентам и процессам, и будет развиваться вместе с компанией.

Очень важную роль в воплощении CRM-стратегии в жизнь играют информационные технологии. Программные средства CRM представляют собой специализированные системы, разработанные для автоматизации тех самых бизнес-процессов, процедур и операций, которые реализованы в виде CRM-стратегии компании. Они минимизируют человеческий фактор при работе с клиентами и позволяют повысить прозрачность деятельности в сферах продаж, маркетинга и клиентского обслуживания. [2]

Такие системы уже внедряются в сферу производства и активно используется ведущими производственными фирмами. Если рассматривать более детально, то CRM система применима в любом бизнесе, где клиент персонифицирован, где высока конкуренция и успех зависит от предоставления наиболее выгодных для клиента условий. Максимального эффекта от внедрения CRM систем добиваются компании, работающие в областях:

- Услуг;
- Производства;
- Оптовой торговли;
- Страхования и финансов;
- Телекоммуникации и транспорта;
- Строительства;
- Розничной торговли.

Проект внедрения CRM-системы обычно связан с глубокими организационными изменениями в компании. В первую очередь, необходимо продумать клиентоориентированную стратегию компании, затем приступить к выбору подходящей системы.

К основным критериям выбора CRM относятся:

- Соответствие функциональных возможностей системы целям бизнеса и стратегии компании;
- Возможность интеграции с другими корпоративными информационными системами;
- Возможность доработки CRM-системы с ориентацией на потребности компании;
- Соответствие CRM техническим требованиям;
- Совокупная стоимость владения CRM-системы (стоимость лицензий, внедрение, сопровождение);
- Доступность услуг по внедрению и поддержке в вашем регионе.

Основная часть. CRM-система, как было уже сказано ранее, может быть внедрена в такие сферы: пищевую промышленность, магазины, супермаркеты, биржевые организации, судостроение, машиностроение, авиастроение, литейное производство. Цель данной статьи рассмотреть возможность внедрения данной системы в промышленную сферу, а именно в сферу литейного производства.

Литейное производство — отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных деталей и заготовок путём заливки расплавленного металла в форму, полость которой имеет конфигурацию требуемой детали. Способ получения изделий путём литья их из металла известен более пяти тысяч лет. Первыми отливками были несложные предметы домашнего обихода и украшения, отливаемые из меди и бронзы: котлы, ручной инвентарь, серьги, кресты, кольца и т. д. [1]

Данная отрасль уже давно стала необходимой для фактически любой деятельности человека. Каждый день литейный завод переплавляет тонны металла и выпускает тысячи своей продукции (листы металла, профиля, трубы).

Еще с 2000 года начался рост внутреннего потребления проката алюминия (на 17% по сравнению с предыдущим годом), что было характерно для продукции высокого передела всех цветных металлов. Структура потребления алюминиевого проката по отраслям промышленности выглядит так, как показано на рис. 1 [4].

Количество потребителей на продукцию литейной промышленности всегда велико. Но с развитием экономических отношений конкуренция между заводами только увеличивается. Необходимо сказать, что на рынке можно наблюдать также появление новых технически развитых и конкурентоспособных заводов, предприятий, представителей литейного производства. Следовательно, для повышения своей конкурентоспособности на мировом рынке заводу нужен эффективный отдел продаж.

Уже в августе 2009 года товарная структура экспорта украинской металлопродукции выглядит как показано на рис. 2 [5].

Классический отдел продаж любого завода состоит из менеджеров по продажам и руководителя. Зачастую отдел продаж практически не связан с процессом производства. Это означает, что при недостачи у завода сырья, необходимого для производства конкретного вида продукции, отдел по продажам будет продолжать искать клиентов для данного вида товара вместо того, чтобы обратить большее внимание на продукцию, которая производится заводом. Это связано с нехваткой информации у отдела продаж.

Также большинство отделов продаж не имеют общей базы данных клиентов. Часто менеджер, который увольняется с работы, забирает всю ценную коммерческую информацию о своих клиентах с собой. Таким образом, завод или предприятие теряет огромное количество своих потенциальных клиентов или передает их конкурентам, в том случае если менеджер был завербован.

К недостаткам такой системы также можно отнести невозможность оценки работы менеджера на протяжении всего рабочего месяца. Эффективность звонков, качество переговоров и своевременные ответы на телефонные звонки и электронные письма не отображаются в отчетах.



Рис. 1. Основные потребители алюминиевого проката в 2001 г.

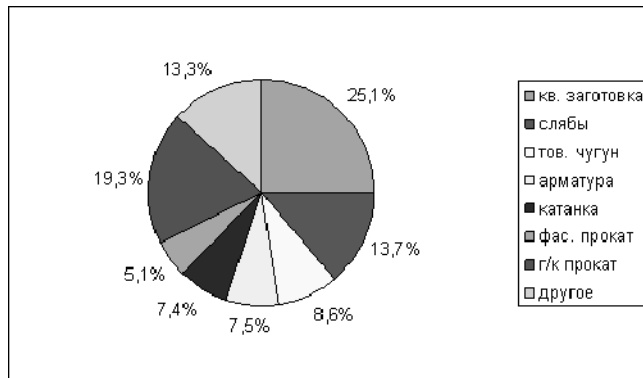


Рис. 2. Товарная структура экспорта украинской металлопродукции в августе 2009 г.
 Источник: ГП "Держззовниинформ"

Внедрение CRM-системы в отдел продаж может решить большинство вышеназванных проблем.

При разработке CRM-системы для литейного производства можно добиться получения информации от завода о целесообразности поиска клиентов для конкретного вида продукции на необходимый период времени. Тогда, система сможет определить приоритетных клиентов, например, клиентов, продукция для которых не была приостановлена по техническим либо ресурсным причинам.

Также внедрение CRM-системы в литейное производство подразумевает наличие базы данных клиентов, что сводит на нет вероятность потери потенциальных покупателей у завода, и позволяет равномерно распределить заказчиков среди менеджеров. Появляется возможность предоставления руководящему составу важной аналитической информации, например, отчетов об эффективности работы сотрудников, о количестве и эффективности операций, произведенных одним сотрудником в месяц. Отчеты могут быть оформлены в графическом виде.

Вывод. В условиях рыночных отношений, для литейного производства возникает потребность в повышении своей конкурентоспособности на фоне всех остальных предприятий. Одним из решений данной проблемы является внедрение в предприятие CRM-системы. Она позволит не только более качественно осуществлять процесс обслуживания заказчиков, но и при должном исследовании процесса литейного производства возможно внедрение специфических функций, которые будут способствовать повышению эффективности процесса менеджмента предприятия.

Список литературы

1. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki>, своб. - Загл. с экрана.
2. Terrasoft 2002-2011 [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://terrasoft.ua/products/CRM/definition>, своб. - Загл. с экрана.
3. CRM система, внедрение CRM [Электронный ресурс] – режим доступа <http://www.softcom.ua/crm/>, своб. - Загл. с экрана.
4. Текущее и перспективное потребление металлов в России и Украине [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.marketing.spb.ru/mr/industry/consuption_metal_02_4.htm, своб. - Загл. с экрана.
5. Экспорт металлопродукции: Украина меняет приоритеты [Электронный ресурс] – режим доступа <http://minprom.ua/articles/25945.html>, своб. - Загл. с экрана.

References

1. Svobodnaja jenciklopedija [Jelektronnyj resurs] – rezhim dostupa: <http://ru.wikipedia.org/wiki>, svob. Zagl. s jekrana.
2. Terrasoft 2002-2011 [Jelektronnyj resurs] – rezhim dostupa: <http://terrasoft.ua/products/CRM/definition>, svob. Zagl. s jekrana.

3. CRM sistema, vnedrenie CRM [Jelektronnyj resurs] – rezhim dostupa <http://www.softcom.ua/crm/>, svob. Zagl. s jekrana.

4. Tekuwee i perspektivnoe potreblenie metallov v Rossii i Ukraine [Jelektronnyj resurs] – rezhim dostupa: http://www.marketing.spb.ru/mr/industry/ consuption_metal_02_4.htm, svob. Zagl. s jekrana.

5. Jeksport metalloprodukcii: Ukraina menjaet priorityty [Jelektronnyj resurs] – rezhim dostupa <http://minprom.ua/articles/25945.html>, svob. Zagl. s jekrana.

Крисанов М.А., Дьомин М.К., Осеніна Г.Ю.

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ВЗАЄМО-ВІДНОШЕННЯМИ З КЛІЄНТАМИ ДЛЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті розглянуті особливості автоматизації процесів взаємовідносин з клієнтами виробничих підприємств на прикладі ливарного виробництва. Основною метою впровадження систем управління взаємовідносинами з клієнтами (CRM-систем) є оптимізація бізнес-процесів, спрямованих на залучення нових клієнтів і зміцнення взаємин з існуючими. Розглянуто специфіку сучасних CRM-систем. На основі дослідження функціонування відділу продажів ливарного заводу сформульовані вимоги до CRM-системі виробничого підприємства, яка дозволить підвищити ефективність роботи менеджерів зі збуту. Серед вимог присутні: можливість ведення єдиної бази даних клієнтів, формування звітів про результати діяльності співробітників відділу продажів, управління маркетингом, можливість доопрацювання використовуваної системи з орієнтацією на потреби компанії, доступність і простота розгортання системи. В якості основної специфічного вимоги зазначена необхідність використання CRM-системою даних про нинішній стан процесу виробництва, а також про обсяги поточних і прогнозованих складських запасів.

Ключові слова: CRM-система, ливарне виробництво, інформаційна-система, менеджмент, відділ продажів.

Krisanov M.A., Djomin M.K., Osenina G.Yu.

FEATURES OF AUTOMATION CONTROL MOOTNOSHENIYAMI INTERACTION WITH CUSTOMERS FOUNDRY-PRODUCED

The paper considers to the features of client relationships process automation for manufacturing companies as an example of foundry. The main purpose of customer relationship management systems (CRM-systems) implementation is the optimization of business processes aimed at attracting new customers and strengthen relationships with existing ones. Specificity of modern CRM-systems is considered. Based on the research of functioning of foundry sales department the requirements to CRM-system of manufacturing facilities are formulated. They will improve the efficiency of the sales manager. Among the requirements are present: the possibility of a common customer database, report on the performance of the sales, marketing management, the ability to the system revision focusing on the needs of the company, availability, and ease of deployment. The main specific requirements indicated the need for a CRM-system data on the current state of the production process, as well as on the amount of current and planning inventory.

Keywords: CRM-system, foundry information system, engineering, management, sales department.

Дьомин М. К. – к.т.н., доцент кафедри інформатики Восточноукраїнського національного університета ім. В. Даля (г. Луганск);

Крысанов М. А. – студент кафедри інформатики Восточноукраїнського національного університета ім. В. Даля (г. Луганск);

Осеніна Г.Ю. – студентка кафедри інформатики Восточноукраїнського національного університета ім. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Пожидаев В.Ф., д.т.н., проф., завідуючий кафедрою інформатики Восточноукраїнського національного університета ім. В. Даля (г. Луганск)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЛОГО ПАРАМЕТРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗГИБА СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Рассматривается задача изгиба трехслойных пластин симметричного по толщине строения с изотропными несущими слоями и нелинейно-упругим наполнителем. Приводятся уравнения изгиба круглых пластин при произвольном и осесимметричном нагружении. Методом малого параметра построены приближения для нелинейных уравнений изгиба круглой пластины.

Ключевые слова: трёхслойная симметричная пластина, круглая пластина, нелинейно-упругий наполнитель

Постановка проблемы

Трёхслойные элементы конструкций широко применяются в современных отраслях промышленности, что обуславливает необходимость разработки методов их расчета. Актуальной является проблема обобщения классических теорий с применением уточненных моделей, отражающих поведение современных материалов.

В подавляющем числе публикаций, посвященных теории и методам расчёта прямоугольных и круглых трехслойных пластин, как в линейной, так и в нелинейной постановке, математические модели деформированного состояния строились на определяющих соотношениях, подчиняющихся обобщённому закону Гука.

В настоящей работе получены уравнения изгиба трехслойных пластин симметричного строения с изотропными наружными слоями и нелинейно-упругим по [2] материалом наполнителя. Для перехода к уравнениям изгиба трёхслойных пластин используются результаты [4].

Изгиб трехслойных круглой пластины симметричного строения.

Уравнения изгиба трехслойной прямоугольной пластины следуют из уравнений [4], сформулированных для пологой оболочки. В трёхслойной пластине, наряду с симметрией по толщине, наружные слои полагаются изотропными, с одинаковыми механическими свойствами.

Принимая во внимание симметрию деформированного состояния пластины ($u_1 = -u_2 = u$, $v_1 = -v_2 = v$), порядок исходной системы понижается.

Для описания изгиба круглой пластины выполняется переход к полярной системе координат (r, φ) . При этом удобно, аналогично [1], совместить ось x прямоугольной системы координат с радиус-вектором r . Производя замену координат в полученных уравнениях изгиба трехслойной симметричной пластины, получаем систему трех нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} & A_{110} w_{,rrr} + A_{111} \left(\left(\frac{1}{r} w_{,r} \right)_{,r} + \left(\frac{1}{r^2} w_{,\varphi\varphi} \right)_{,r} \right) + A_{112} w_{,r} + (A_{113} - A_{114}) u_{,rr} + \\ & + (A_{115} - A_{116}) \left(\frac{1}{r} v_{,\varphi} \right)_{,r} + 2A_{117} u + (A_{118} - A_{119}) \left(\frac{1}{r} u_{,r} + \frac{1}{r^2} u_{,\varphi\varphi} \right) + A_{120} \left(u_{,r}^2 w_{,rr} \right)_{,r} + \\ & + A_{122} u^2 w_{,r} + A_{123} \left(u_{,r} w_{,rr}^2 \right)_{,r} + A_{124} \left(w_{,rr}^3 \right)_{,r} + A_{125} \left(u w_{,r}^2 \right)_{,r} + A_{126} w_{,r}^3 + \\ & + (A_{127} + A_{128} - A_{129} - A_{130}) \left(u_{,r}^3 \right)_{,r} + 8A_{131} u^3 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A_{310} \left(\frac{3}{r^2} w_{,r\varphi} - \frac{2}{r^3} w_{,\varphi} + \frac{1}{r^3} w_{,\varphi\varphi\varphi} \right) + A_{311} \left(\frac{w_{,\varphi}}{r} \right)_{,rr} + A_{312} \left(\frac{1}{r} w_{,\varphi} \right) + \\
& + (A_{313} - A_{314}) \left(\frac{1}{r} v_{,r} + \frac{1}{r^2} v_{,\varphi\varphi} \right) + (A_{315} - A_{316}) \left(\frac{1}{r} u_{,\varphi} \right)_{,r} + 2A_{317} v + (A_{318} - A_{319}) v_{,rr} + \\
& + A_{320} \left(\frac{2v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{v_{,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right) + A_{322} \left(\frac{v^2 w_{,\varphi}}{r} \right) + \\
& + A_{323} \left(\left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 + \frac{2v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right) + \\
& + 3A_{324} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + A_{325} \left(\frac{vw_{,\varphi}^2}{r^2} \right) + A_{326} \left(\frac{w_{,\varphi}^3}{r^3} \right) + \\
& + (A_{327} + A_{328} - A_{329} - A_{330}) \left(\frac{3v_{,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \right) + 8A_{331} v^3 = 0; \\
& A_{510} \left(w_{,rrrr} + \frac{3w_{,rr}}{r^2} - \frac{3w_{,r}}{r^3} + \frac{6w_{,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + A_{512} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)_{,rr} + \\
& + A_{513} \left(w_{,rr} + \frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + (A_{515} - A_{518}) \left(u_{,rrr} + \frac{3v_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& + (A_{516} - A_{519}) \left(\frac{u_{,r}}{r} + \frac{u_{,\varphi\varphi}}{r^2} + \frac{v_{,r\varphi}}{r} + \frac{v_{,\varphi}}{r^2} \right)_{,r} + (A_{517} - A_{520}) \left(u_{,r} + \frac{v_{,\varphi}}{r} \right) + \\
& + A_{527} \left(\left(w_{,rr}^3 \right)_{,rr} + 6 \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right)^2 \right) + \\
& + 3 \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3w_{,rr}}{r^2} - \frac{3w_{,r}}{r^3} + \frac{6w_{,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + \\
& + A_{529} \left(\frac{3w_{,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \left(w_{,r}^3 \right)_{,r} \right) + (A_{533} - A_{536}) \left(\left(u_{,r}^3 \right)_{,rr} + \frac{6v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \right) + \\
& + \frac{3v_{,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{3v_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + 2A_{535} \left(\left(u^3 \right)_{,r} + \frac{1}{r} \left(v^3 \right)_{,\varphi} \right) + \\
& + 2A_{543} \left(\frac{v^2 w_{,r}}{r} + \frac{1}{r^2} \left(v^2 w_{,\varphi} \right)_{,\varphi} + \left(u^2 w_{,r} \right)_{,r} \right) + (A_{544} + A_{548}) \left[\left(u_{,r}^2 w_{,rr} \right)_{,rr} + \right. \\
& + \frac{4v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{2v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3v_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& \left. + \frac{v_{,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{3w_{,rr}}{r^2} - \frac{3w_{,r}}{r^3} + \frac{6w_{,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + 2 \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \right] +
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& + (A_{545} - A_{549}) \left[\left(u_{,r} w_{,rr} \right)_{,rr} + \frac{2v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right)^2 + \right. \\
& + \frac{2v_{,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{,rr}}{r^2} - \frac{3w_{,r}}{r^3} + \frac{6w_{,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + \\
& + 4 \left(\frac{v_{,r}}{r} + \frac{v_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& \left. + \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3v_{,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right] + 2A_{547} (uw_{,r})_{,r} + \\
& + 2A_{552} \left(\frac{2vw_{,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{,r}}{r} + \frac{w_{,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{v_{,\varphi} w_{,\varphi}^2}{r^3} \right) = q(r, \varphi),
\end{aligned}$$

где значения коэффициентов системы определяются следующим образом:

$$A_{110} = A_{310} = -\frac{h\delta}{6} \tilde{B}_1, \quad A_{111} = A_{311} = -\frac{h\delta}{6} (\tilde{B}_1 v_0 + 2\tilde{G}), \quad A_{112} = A_{312} = \tilde{G} \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right),$$

$$A_{113} = A_{313} = B_{11} \delta + \frac{2}{3} h \tilde{B}_1, \quad A_{114} = A_{314} = \frac{1}{3} h \tilde{B}_1, \quad A_{115} = A_{315} = (B_{11} + B_{66}) \delta + \frac{2}{3} h (\tilde{B}_1 v_0 + \tilde{G}),$$

$$A_{116} = A_{316} = \frac{1}{3} h (\tilde{B}_1 v_0 + \tilde{G}), \quad A_{117} = A_{317} = -\frac{1}{2h} \tilde{G}, \quad A_{118} = A_{318} = B_{66} \delta + \frac{2}{3} h \tilde{G},$$

$$A_{119} = A_{319} = \frac{1}{3} h \tilde{G}, \quad A_{120} = A_{320} = -\frac{9h\delta}{10} \tilde{G}^*, \quad A_{122} = A_{322} = \frac{1}{h^2} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right),$$

$$A_{123} = A_{323} = \frac{2h\delta^2}{5} \tilde{G}^*, \quad A_{124} = A_{324} = -\frac{h\delta^3}{20} \tilde{G}^*, \quad A_{125} = A_{325} = -\frac{2}{h} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right)^2,$$

$$A_{126} = \frac{4}{3} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right)^3, \quad A_{127} = \frac{4}{5} h \tilde{G}^*, \quad A_{128} = \frac{2}{5} h \tilde{G}^*, \quad A_{129} = \frac{1}{10} h \tilde{G}^*, \quad A_{130} = \frac{3}{10} h \tilde{G}^*,$$

$$A_{131} = A_{331} = -\frac{1}{6h^3} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2, \quad A_{326} = A_{324} = -\frac{h\delta^3}{20} \tilde{G}^*, \quad A_{327} = \frac{4}{5} h \tilde{G}^*, \quad A_{328} = \frac{2}{5} h \tilde{G}^*,$$

$$A_{329} = \frac{1}{5} h \tilde{G}^*, \quad A_{330} = \frac{3}{5} h \tilde{G}^*, \quad A_{510} = A_{511} = B_{11} \frac{\delta^3}{6} + \frac{h}{6} \tilde{B}_1 \delta^2,$$

$$A_{512} = (2B_{12} + 4B_{66}) \frac{\delta^3}{6} + \frac{h}{6} \delta^2 (\tilde{B}_1 v_0 + 2\tilde{G}), \quad A_{513} = A_{514} = -2h\tilde{G} \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right)^2,$$

$$A_{515} = -A_{518} = A_{521} = -A_{524} = -\frac{h\delta}{6} \tilde{B}_1, \quad A_{516} = -A_{519} = A_{522} = -A_{525} = -\frac{h\delta}{6} (\tilde{B}_1 v_0 + 2\tilde{G}),$$

$$A_{517} = -A_{520} = A_{523} = -A_{526} = \tilde{G} \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right), \quad A_{527} = A_{530} = \frac{h\delta^4}{20} \tilde{G}^*,$$

$$A_{529} = A_{532} = -\frac{8}{3} h \tilde{\gamma}_2 \tilde{G} \left(1 + \frac{\delta}{2h} \right)^4, \quad A_{533} = -A_{536} = A_{538} = -A_{541} = -\frac{3h\delta}{10} \tilde{G}^*,$$

$$\begin{aligned}
A_{535} = A_{540} &= \frac{1}{3h^2} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h}\right), \quad A_{543} = A_{546} = -\frac{2}{h} \tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h}\right)^2, \\
A_{544} = A_{548} = A_{550} = A_{551} &= \frac{2h\delta^2}{5} \tilde{G}^*, \quad A_{545} = -A_{549} = A_{554} = -A_{553} = -\frac{3h\delta^3}{20} \tilde{G}^*, \\
A_{547} &= 4\tilde{G} \tilde{\gamma}_2 \left(1 + \frac{\delta}{2h}\right)^3, \quad A_{552} = -\frac{3h\delta^3}{20} \tilde{G}^*, \\
\tilde{G}^* &= \tilde{\gamma}_2 \nu_1 \nu_4 \tilde{B}_1, \quad \tilde{B}_1 = \frac{2\tilde{G}}{1-\nu_0}, \quad \nu_1 = \frac{8}{9} \left(1 + \frac{\nu_0}{(1-\nu_0)^2}\right), \quad \nu_3 = \frac{1}{3} \frac{(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}{1-\nu_0}, \\
\nu_4 &= \frac{3}{4} (1-\nu_0) \nu_1, \quad \nu_6 = \frac{1}{3} \frac{1-2\nu_0}{1-\nu_0}, \quad \nu_0 = \frac{1}{2} \frac{3\tilde{K} - 2\tilde{G}}{3\tilde{K} + \tilde{G}}, \quad B_{11} = \frac{E}{1-\mu^2}, \quad B_{12} = \frac{\mu E}{1-\mu^2}, \quad B_{66} = G_{12},
\end{aligned}$$

\tilde{G} , \tilde{K} – модули сдвига и объемной деформации материала среднего слоя; E , G_{12} , μ – модули упругости, сдвига и коэффициент Пуассона для несущих слоев; $\tilde{\gamma}_2$ – параметр нелинейной упругости материала заполнителя, δ , h – толщины несущих слоёв и заполнителя.

Варианты граничных условий для круглой трехслойной пластины:

а) свободное опирание:

$$w = w_{,rr} = v = u_{,r} = 0 \quad \text{при } r = R, \text{ где } R \text{ – радиус пластинки.}$$

б) защемление наружного контура:

$$u = v = w = w_{,r} = 0 \quad \text{при } r = R.$$

Метод малого параметра и случай осесимметричного нагружения пластины.

Одним из подходов к решению системы (1) является метод разложения по малому параметру. Выделим из нелинейных слагаемых системы малый параметр λ , для этого перемещения представим в виде рядов по степеням малого параметра

$$\begin{aligned}
u(r, \varphi) &= u_0(r, \varphi) + \sum_{i=1}^n \lambda^i u_i(r, \varphi); \quad v(r, \varphi) = v_0(r, \varphi) + \sum_{i=1}^n \lambda^i v_i(r, \varphi); \\
w(r, \varphi) &= w_0(r, \varphi) + \sum_{i=1}^n \lambda^i w_i(r, \varphi),
\end{aligned}$$

где $\lambda = \frac{\gamma_2 \tilde{K}}{(3\tilde{K} + \tilde{G})\tilde{G}^2}$ – малый физический параметр [2].

Тогда, после преобразований, система уравнений нулевого приближения разложения по параметру (линейно-упругая постановка задачи) имеет вид

$$\begin{aligned}
&A_{110} w_{0,rrr} + A_{111} \left(\left(\frac{1}{r} w_{0,r} \right)_{,r} + \left(\frac{1}{r^2} w_{0,\varphi\varphi} \right)_{,r} \right) + A_{112} w_{0,r} + (A_{113} - A_{114}) u_{0,rr} + \\
&+ (A_{115} - A_{116}) \left(\frac{1}{r} v_{0,\varphi} \right)_{,r} + 2A_{117} u_0 + (A_{118} - A_{119}) \left(\frac{1}{r} u_{0,r} + \frac{1}{r^2} u_{0,\varphi\varphi} \right) = 0; \\
&A_{310} \left(\frac{3}{r^2} w_{0,r\varphi} - \frac{2}{r^3} w_{0,\varphi} + \frac{1}{r^3} w_{0,\varphi\varphi\varphi} \right) + A_{311} \left(\frac{w_{0,\varphi}}{r} \right)_{,rr} + A_{312} \left(\frac{1}{r} w_{0,\varphi} \right)_{,r} + \\
&+ (A_{313} - A_{314}) \left(\frac{1}{r} v_{0,r} + \frac{1}{r^2} v_{0,\varphi\varphi} \right) + (A_{315} - A_{316}) \left(\frac{1}{r} u_{0,\varphi} \right)_{,r} +
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
& +2A_{317}v_0 + (A_{318} - A_{319})v_{0,rr} = 0; \\
& A_{510} \left(w_{0,rrrr} + \frac{3w_{0,rr}}{r^2} - \frac{3w_{0,r}}{r^3} + \frac{6w_{0,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{0,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + A_{512} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)_{,rr} \\
& + A_{513} \left(w_{0,rr} + \frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + (A_{515} - A_{518}) \left(u_{0,rrr} + \frac{3v_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& + (A_{516} - A_{519}) \left(\frac{u_{0,r}}{r} + \frac{u_{0,\varphi\varphi}}{r^2} + \frac{v_{0,r\varphi}}{r} + \frac{v_{0,\varphi}}{r^2} \right)_{,r} + (A_{517} - A_{520}) \left(u_{0,r} + \frac{v_{0,\varphi}}{r} \right) = q(r, \varphi).
\end{aligned}$$

Для первого и последующих приближений, из соображений компактности, запишем

$$\begin{aligned}
& A_{110}w_{i,rrr} + A_{111} \left(\left(\frac{1}{r} w_{i,r} \right)_{,r} + \left(\frac{1}{r^2} w_{i,\varphi\varphi} \right)_{,r} \right) + A_{112}w_{i,r} + (A_{113} - A_{114})u_{i,rr} + \\
& + (A_{115} - A_{116}) \left(\frac{1}{r} v_{i,\varphi} \right)_{,r} + 2A_{117}u_i + (A_{118} - A_{119}) \left(\frac{1}{r} u_{i,r} + \frac{1}{r^2} u_{i,\varphi\varphi} \right) = \Phi_{1i}; \\
& A_{310} \left(\frac{3}{r^2} w_{i,r\varphi} - \frac{2}{r^3} w_{i,\varphi} + \frac{1}{r^3} w_{i,\varphi\varphi\varphi} \right) + A_{311} \left(\frac{w_{i,\varphi}}{r} \right)_{,rr} + A_{312} \left(\frac{1}{r} w_{i,\varphi} \right) + \\
& + (A_{313} - A_{314}) \left(\frac{1}{r} v_{i,r} + \frac{1}{r^2} v_{i,\varphi\varphi} \right) + (A_{315} - A_{316}) \left(\frac{1}{r} u_{i,\varphi} \right)_{,r} + \\
& + 2A_{317}v_i + (A_{318} - A_{319})v_{i,rr} = \Phi_{3i}; \\
& A_{510} \left(w_{i,rrrr} + \frac{3w_{i,rr}}{r^2} - \frac{3w_{i,r}}{r^3} + \frac{6w_{i,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{i,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{i,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + A_{512} \left(\frac{w_{i,r}}{r} + \frac{w_{i,\varphi\varphi}}{r^2} \right)_{,rr} \\
& + A_{513} \left(w_{i,rr} + \frac{w_{i,r}}{r} + \frac{w_{i,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + (A_{515} - A_{518}) \left(u_{i,rrr} + \frac{3v_{i,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{i,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{i,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& + (A_{516} - A_{519}) \left(\frac{u_{i,r}}{r} + \frac{u_{i,\varphi\varphi}}{r^2} + \frac{v_{i,r\varphi}}{r} + \frac{v_{i,\varphi}}{r^2} \right)_{,r} + (A_{517} - A_{520}) \left(u_{i,r} + \frac{v_{i,\varphi}}{r} \right) = \Phi_{5i},
\end{aligned} \tag{3}$$

где

$$\begin{aligned}
\Phi_{11} &= -\frac{1}{\lambda} \left[A_{120} \left(u_{0,r}^2 w_{0,rr} \right)_{,r} + A_{122} u_0^2 w_{0,r} + A_{123} \left(u_{0,r} w_{0,rr}^2 \right)_{,r} + A_{124} \left(w_{0,rr}^3 \right)_{,r} + A_{125} \left(u_0 w_{0,r}^2 \right) + \right. \\
& \quad \left. + A_{126} w_{0,r}^3 + (A_{127} + A_{128} - A_{129} - A_{130}) \left(u_{0,r}^3 \right)_{,r} + 8A_{131} u_0^3 \right]; \\
\Phi_{31} &= -\frac{1}{\lambda} \left[A_{320} \left(\frac{2v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{v_{0,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right) \right] + \\
& + A_{322} \left(\frac{v_0^2 w_{0,\varphi}}{r} \right) + A_{323} \left(\left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 + \frac{2v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right) + 3A_{324} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + A_{325} \left(\frac{v_0 w_{0,\varphi}^2}{r^2} \right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + A_{326} \left(\frac{w_{0,\varphi}^3}{r^3} \right) + (A_{327} + A_{328} - A_{329} - A_{330}) \left(\frac{3v_{0,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \right) + 8A_{331}v_0^3 \Big]; \\
\Phi_{51} = & -\frac{1}{\lambda} \left\{ A_{527} \left(6 \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right)^2 + (w_{0,rr}^3)_{,rr} + \right. \\
& + 3 \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3w_{0,rr}}{r^2} - \frac{3w_{0,r}}{r^3} + \frac{6w_{0,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{0,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) \Big) + \\
& + A_{529} \left(\frac{3w_{0,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + (w_{0,r}^3)_{,r} \right) + (A_{533} - A_{536}) \left(\frac{6v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 + \right. \\
& + (u_{0,r}^3)_{,rr} + \frac{3v_{0,\varphi}^2}{r^2} \left(\frac{3v_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \Big) + 2A_{535} \left((u_0^3)_{,r} + \frac{1}{r} (v_0^3)_{,\varphi} \right) + \\
& + 2A_{543} \left(\frac{v_0^2 w_{0,r}}{r} + \frac{1}{r^2} (v_0^2 w_{0,\varphi})_{,\varphi} + (u_0^2 w_{0,r})_{,r} \right) + (A_{544} + A_{548}) \left[(u_{0,r}^2 w_{0,rr})_{,rr} + \right. \\
& + \frac{4v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{2v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3v_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& + \frac{v_0^2}{r^2} \left(\frac{3w_{0,rr}}{r^2} - \frac{3w_{0,r}}{r^3} + \frac{6w_{0,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{0,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + 2 \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \Big] + \\
& + (A_{545} - A_{549}) \left[(u_{0,r} w_{0,rr}^2)_{,rr} + \frac{2v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right)^2 + \right. \\
& + \frac{2v_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{0,rr}}{r^2} - \frac{3w_{0,r}}{r^3} + \frac{6w_{0,r\varphi\varphi}}{r^3} - \frac{8w_{0,\varphi\varphi}}{r^4} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi\varphi}}{r^4} \right) + \\
& + 4 \left(\frac{v_{0,r}}{r} + \frac{v_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) \left(\frac{3w_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2w_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{w_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) + \\
& \left. + \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right)^2 \left(\frac{3v_{0,r\varphi}}{r^2} - \frac{2v_{0,\varphi}}{r^3} + \frac{v_{0,\varphi\varphi\varphi}}{r^3} \right) \right] + \\
& + 2A_{547} (u_0 w_{0,r}^2)_{,r} + 2A_{552} \left(\frac{2v_0 w_{0,\varphi}}{r} \left(\frac{w_{0,r}}{r} + \frac{w_{0,\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \frac{v_{0,\varphi} w_{0,\varphi}^2}{r^3} \right) \Big\}.
\end{aligned}$$

В выражениях для Φ_{ki} индекс k принимает значения 1, 3, 5, а индекс i соответствует номеру приближения в разложении по параметру. Для последующих приближений выражения Φ_{ki} здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Если нагрузка $q(r, \varphi)$ распределена симметрично относительно оси, проходящей через центр пластины, то перемещения не будут зависеть от угла φ . Для осесимметричного случая, система (2), аналогично [3], распадается на две части: на систему из двух уравнений относительно функций u_0 , w_0 и третье уравнение относительно v_0 , которое из физических соображений затем отбрасывается

$$\begin{aligned}
& A_{110} w_{0,rrr} + A_{111} \left(\frac{w_{0,r}}{r} \right)_{,r} + A_{112} w_{0,r} + (A_{113} - A_{114}) u_{0,rr} + 2A_{117} u_0 + (A_{118} - A_{119}) \frac{u_{0,r}}{r} = 0; \\
& A_{510} \left(w_{0,rrrr} + 3 \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} w_{0,r} \right)_{,r} \right) + A_{512} \left(\frac{1}{r} w_{0,r} \right)_{,rr} + A_{513} \left(w_{0,rr} + \frac{1}{r} w_{0,r} \right) + (A_{515} - A_{518}) u_{0,rrr} + \\
& \quad + (A_{516} - A_{519}) \left(\frac{1}{r} u_{0,r} \right)_{,r} + (A_{517} - A_{520}) u_{0,r} = q(r); \\
& (A_{313} - A_{314}) \frac{v_{0,r}}{r} + 2A_{317} v_0 + (A_{318} - A_{319}) v_{0,rr} = 0.
\end{aligned}$$

Учитывая вышесказанное, вместо системы (3) в осесимметричном случае имеем систему двух уравнений

$$\begin{aligned}
& A_{110} w_{i,rrr} + A_{111} \left(\frac{w_{i,r}}{r} \right)_{,r} + A_{112} w_{i,r} + (A_{113} - A_{114}) u_{i,rr} + 2A_{117} u_i + (A_{118} - A_{119}) \frac{u_{i,r}}{r} = \Psi_{1i}; \\
& A_{510} \left(w_{i,rrrr} + 3 \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} w_{i,r} \right)_{,r} \right) + A_{512} \left(\frac{1}{r} w_{i,r} \right)_{,rr} + A_{513} \left(w_{i,rr} + \frac{1}{r} w_{i,r} \right) + (A_{515} - A_{518}) u_{i,rrr} + \\
& \quad + (A_{516} - A_{519}) \left(\frac{1}{r} u_{i,r} \right)_{,r} + (A_{517} - A_{520}) u_{i,r} = \Psi_{5i},
\end{aligned}$$

где правые части системы для $i = 1, 2, 3$ можно представить в виде

$$\begin{aligned}
\Psi_{11} &= -\frac{1}{\lambda} \left[A_{120} \left(u_{0,r}^2 w_{0,rr} \right)_{,r} + A_{122} u_0^2 w_{0,r} + A_{123} \left(u_{0,r} w_{0,rr}^2 \right)_{,r} + A_{124} \left(w_{0,rr}^3 \right)_{,r} + \right. \\
& \quad \left. + A_{125} \left(u_0 w_{0,r}^2 \right) + A_{126} w_{0,r}^3 + (A_{127} + A_{128} - A_{129} - A_{130}) \left(u_{0,r}^3 \right)_{,r} + 8A_{131} u_0^3 \right]; \\
\Psi_{51} &= -\frac{1}{\lambda} \left[A_{527} \left(\left(w_{0,rr}^3 \right)_{,rr} + \frac{9}{r^3} w_{0,r}^2 \left(\frac{1}{r} w_{0,r} \right)_{,r} \right) + A_{529} \left(w_{0,r}^3 \right)_{,r} + (A_{533} - A_{536}) \left(u_{0,r}^3 \right)_{,rr} + \right. \\
& \quad \left. + 2A_{535} \left(u_0^3 \right)_{,r} + 2A_{543} \left(u_0^2 w_{0,r} \right)_{,r} + (A_{544} + A_{548}) \left(u_{0,r}^2 w_{0,rr} \right)_{,rr} + \right. \\
& \quad \left. + (A_{545} - A_{549}) \left(u_{0,r} w_{0,rr}^2 \right)_{,rr} + 2A_{547} \left(u_0 w_{0,r}^2 \right)_{,r} \right]; \\
\Psi_{12} &= -\frac{1}{\lambda} \left[A_{120} \left(\left(u_{0,r}^2 w_{1,rr} \right)_{,r} + 2 \left(u_{0,r} u_{1,r} w_{0,rr} \right)_{,r} \right) + A_{122} \left(2u_0 u_1 w_{0,r} + u_0^2 w_{1,r} \right) + \right. \\
& \quad \left. + A_{123} \left(\left(u_{1,r} w_{0,rr}^2 \right)_{,r} + 2 \left(u_{0,r} w_{0,rr} w_{1,rr} \right)_{,r} \right) + 3A_{124} \left(w_{0,rr}^2 w_{1,rr} \right)_{,r} + \right. \\
& \quad \left. + A_{125} \left(u_1 w_{0,r}^2 + 2u_0 w_{0,r} w_{1,r} \right) + 3A_{126} w_{0,r}^2 w_{1,r} + \right. \\
& \quad \left. + 3(A_{127} + A_{128} - A_{129} - A_{130}) \left(u_{0,r}^2 u_{1,r} \right)_{,r} + 24A_{131} u_0^2 u_1 \right]; \\
\Psi_{52} &= -\frac{1}{\lambda} \left[3A_{527} \left(\left(w_{1,rr} w_{0,rr}^2 \right)_{,rr} + \frac{3}{r^4} \left(w_{0,r}^2 w_{1,r} \right)_{,r} - \frac{9}{r^5} w_{0,r}^2 w_{1,r} \right) + 3A_{529} \left(w_{0,r}^2 w_{1,r} \right)_{,r} + \right. \\
& \quad \left. + (A_{533} - A_{536}) \left(u_{0,r}^2 u_{1,rr} \right)_{,rr} + 6A_{535} \left(u_0^2 u_1 \right)_{,r} + 2A_{543} \left(\left(u_0^2 w_{1,r} \right)_{,r} + 2 \left(w_{0,r} u_0 u_1 \right)_{,r} \right) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (A_{544} + A_{548}) \left((u_{0,r}^2 w_{1,rr})_{,rr} + 2(w_{0,rr} u_{0,r} u_{1,r})_{,rr} \right) + \\
& + (A_{545} - A_{549}) \left((u_{1,r} w_{0,rr}^2)_{,rr} + 2(w_{0,rr} w_{1,rr} u_{0,r})_{,r} \right) + 2A_{547} \left((u_1 w_{0,r}^2)_{,r} + 2(w_{0,r} w_{1,r} u_0)_{,r} \right) \Big]; \\
\Psi_{13} = & -\frac{1}{\lambda} \left[A_{120} \left((u_{1,r}^2 w_{0,rr})_{,r} + (u_{0,r}^2 w_{2,rr})_{,r} + 2(u_{0,r} u_{1,r} w_{1,rr})_{,r} + 2(u_{0,r} u_{2,r} w_{0,rr})_{,r} \right) + \right. \\
& + A_{122} (u_1^2 w_{0,r} + u_0^2 w_{2,r} + 2u_0 u_1 w_{1,r} + 2u_0 u_2 w_{0,r}) + \\
& + A_{123} \left((u_{0,r} w_{1,rr}^2)_{,r} + (u_{2,r} w_{0,rr}^2)_{,r} + 2(u_{0,r} w_{0,rr} w_{2,rr})_{,r} + 2(u_{1,r} w_{0,rr} w_{1,rr})_{,r} \right) + \\
& + 3A_{124} \left((w_{0,rr}^2 w_{2,rr})_{,r} + (w_{1,rr}^2 w_{2,rr})_{,r} \right) + \\
& + A_{125} (u_0 w_{1,r}^2 + u_2 w_{0,r}^2 + 2u_0 w_{0,r} w_{2,r} + 2u_1 w_{0,r} w_{1,r}) + 3A_{126} (w_{0,r}^2 w_{2,r} + w_{0,r} w_{1,r}^2) + \\
& + 3(A_{127} + A_{128} - A_{129} - A_{130}) \left((u_{1,r}^2 u_{0,r})_{,r} + (u_{0,r}^2 u_{2,r})_{,r} \right) + 24A_{131} (u_0^2 u_2 + u_0 u_1^2) \Big]; \\
\Psi_{53} = & -\frac{1}{\lambda} \left[3A_{527} \left((w_{0,rr}^2 w_{2,rr})_{,rr} + (w_{1,rr}^2 w_{0,rr})_{,rr} + \frac{3}{r^4} \left((w_{0,r}^2 w_{2,r})_{,r} + (w_{1,r}^2 w_{0,r})_{,r} \right) \right) - \right. \\
& - \frac{9}{r^5} (w_{0,r}^2 w_{2,r} + w_{0,r} w_{1,r}^2) + 3A_{529} \left((w_{0,r}^2 w_{2,r})_{,r} + (w_{1,r}^2 w_{0,r})_{,r} \right) + \\
& + 3(A_{533} - A_{536}) \left((u_{1,r}^2 u_{0,rr})_{,rr} + (u_{0,r}^2 u_{2,rr})_{,rr} \right) + 6A_{535} \left((u_1^2 u_0)_{,r} + (u_0^2 u_2)_{,r} \right) + 2A_{543} \left((u_1^2 w_{0,r})_{,r} + \right. \\
& + (u_0^2 w_{2,r})_{,r} + 2(w_{0,r} u_0 u_2)_{,r} + 2(w_{1,r} u_0 u_1)_{,r} \Big) + (A_{544} + A_{548}) \left((u_{1,r}^2 w_{0,rr})_{,rr} + (u_{0,r}^2 w_{2,rr})_{,rr} + \right. \\
& + 2(w_{0,rr} u_{0,r} u_{2,r})_{,rr} + 2(w_{1,rr} u_{0,r} u_{1,r})_{,rr} \Big) + \\
& + (A_{545} - A_{549}) \left((u_{0,r} w_{1,rr}^2)_{,rr} + (u_{2,r} w_{0,rr}^2)_{,rr} + 2(w_{0,rr} w_{1,rr} u_{1,r})_{,rr} + 2(w_{0,rr} w_{2,rr} u_{0,r})_{,rr} \right) + \\
& + 2A_{547} \left((u_0 w_{1,r}^2)_{,r} + (u_2 w_{0,r}^2)_{,r} + 2(w_{0,r} w_{1,r} u_1)_{,r} + 2(w_{0,r} w_{2,r} u_0)_{,r} \right) \Big].
\end{aligned}$$

Выводы.

1. Получены нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие деформированное состояние круглых трехслойных пластин.
2. Методом малого параметра получены системы рекуррентных уравнений для описания поведения трехслойных пластин при неосесимметричном и осесимметричном видах нагружения.

Литература

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
2. Каудерер Г. Нелинейная механика / Г. Каудерер. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 777 с.
3. Прусаков А.П. Некоторые задачи изгиба круглых трехслойных пластин с легким заполнителем / А.П. Прусаков // Тр. конф. по теор. пластин и оболочек - 1961. - №1. – С. 293–297.
4. Тамуров Ю.Н. Уравнения изгиба и устойчивости трехслойных оболочек с ортотропными и нелинейно-упругими свойствами материалов / Ю.Н. Тамуров // Исслед. по теор. пластин и оболочек - 1990. - №20. – С. 102–112.

References

1. Vol'mir A.S. Ustojchivost' deformiruemykh sistem / A.S. Vol'mir. – M. : Nauka, 1967. – 984 s.

2. Kauderer G. Nelinejnaja mehanika / G. Kauderer. – M. : Izd-vo inostr. lit., 1961. – 777 s.
3. Prusakov A.P. Nekotorye zadachi izgiba kruglyh trehslojnyh plastin s leg-kim zapolnitelem / A.P. Prusakov // Tr. konf. po teor. plastin i obolochek 1961. №1. – S. 293–297.
4. Tamurov Ju.N. Uravnenija izgiba i ustojchivosti trehslojnyh obolochek s or-totropnymi i nelinejno-uprugimi svojstvami materialov / Ju.N. Tamurov // Issled. po teor. plastin i obolochek 1990. №20. – S. 102–112.

Розглядається задача вигину тришарових пластин симетричної по товщині будови з ізотропними несучими шарами й нелінійно-пружним заповнювачем. Приводяться рівняння для вигину круглих пластин при довільному та осесиметричному навантаженнях. Методом малого параметра побудовані наближення для нелінійних рівнянь вигину круглої пластини.

Ключові слова: тришарова симетрична пластина, кругла пластина, нелінійно-пружний заповнювач

The problem of bending of symmetric sandwich plates with isotropic face layers and the nonlinear-elastic core is examined. Also, it gives the equations for circular plates bending with arbitrary and axisymmetric loads. The bending circular plate equation approximations are constructed using the method of a small parameter.

Keywords: sandwich symmetrical plate, circular plate, nonlinear-elastic core

Кудин Алексей Владимирович, аспирант кафедры математического моделирования Запорожского национального университета (г. Запорожье);

Тамуров Юрий Николаевич, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Запорожского национального университета (г. Запорожье).

Рецензент: Грицак В.З., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики Запорожского национального университета (г. Запорожье).

УДК 622

Б.Н. Локотщ, М.А. Милостян

г. Луганск

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА

Проектирование режимов промывок при строительстве скважин для месторождений сланцевого газа сводится к проектированию режимов промывок при проводке горизонтальных и наклонно направленных скважин на нефть и газ.

Ключевые слова: сланцевый газ, бурение, промывочная жидкость.

За последнее десятилетие по всему миру в сланцевых породах были разведаны гигантские запасы природного газа. По некоторым оценкам, только в США можно добыть 1000 триллионов кубических футов газа – достаточно, чтобы обеспечить потребности страны на 45 лет вперед. Сейчас технические достижения меняют цены и открывают путь для сланцевого газа, который станет ресурсом десятилетия и изменит правила в отрасли.

При добыче сланцевого газа пробуривается одна вертикальная скважина, от которой затем на большой глубине расходятся горизонтальные скважины, длина которых может достигать 2–3 км.

Несмотря на многолетний опыт проводки горизонтальных скважин, вопросы их эффективной промывки изучены недостаточно. Нет общепринятой методики расчета необходимых параметров промывочных жидкостей.

Все это обуславливает необходимость более глубокого теоретического и экспериментального изучения процессов транспортирования шлама при проводке горизонталь-

ной скважины, по повышению эффективности очистки горизонтального ствола скважины от выбуренной породы. Исследования влияния на транспорт шлама различных факторов: реологических свойств промывочных жидкостей, эксцентриситета кольцевого пространства, вращения труб и их конструкции, зенитного угла и т.д.

Задачи, связанные с изучением данных процессов это, прежде всего:

1. Изучение влияния реологических параметров промывочных жидкостей, эксцентриситета кольцевого пространства, зенитного угла на процесс транспортирования шлама по наклонно направленному и горизонтальному участку ствола скважины.

2. Разработка математической модели расчета распределения скоростей течения жидкости, по окружности эксцентричного кольцевого пространства при различных режимах течения и свойствах жидкостей.

Одной из главных проблем при бурении наклонно направленных и горизонтальных скважин является недостаточная очистка ствола скважины, которая приводит к целому ряду осложнений и удлинению сроков строительства скважин.

Совершенствование методов очистки ведется по нескольким направлениям – улучшение реологических параметров промывочных жидкостей, совершенствование гидродинамики промывки, применение вязкоупругих буферных систем.

Проблема транспортирования частиц выбуренной породы по горизонтальному участку ствола скважины в некоторой степени сходна с проблемами гидротранспорта твердых материалов в промышленности. Однако результаты этих исследований не могут быть прямо применены к процессу транспортирования шлама в горизонтальных скважинах, т.к. в системах напорного гидротранспорта несущей средой является вода, движущаяся в трубах, а бурение горизонтальных скважин осуществляется с промывкой растворами, относящимися к неньютоновским, в реологическом смысле, системам, движущимися в эксцентричном кольцевом пространстве.

Вопросы транспорта шлама в горизонтальных скважинах описываются в трудах: Акбулатова Т.О., А.В., Кашкарова Н.Г., Крецула В.В., Крылова В.И., Файна Г.М., работах компании «M-I Drilling fluids» и др.

Среди теоретических работ по расчету промывки горизонтальных скважин следует выделить Крылова В.И. и Крецула В.В.[1], предложивших следующую формулу для расчета необходимого расхода промывочной жидкости, обеспечивающего транспорт шлама в горизонтальной скважине:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D_C^2 - D_T^2)}{0,0008 \cdot \rho \cdot (330 \cdot \eta + \tau_0) \cdot (2 - \sin \alpha)} \cdot \left(\frac{600 \cdot \eta + \tau_0}{330 \cdot \eta + \tau_0} \right)^{2,52},$$

где D_C, D_T – диаметр скважины и бурильных труб соответственно;
 η, τ_0 – структурная вязкость и динамическое напряжение сдвига раствора;
 ρ – плотность промывочной жидкости;
 α – зенитный угол ствола скважины.

Предложенная зависимость была получена для жидкостей, описываемых моделью Бингама. Из уравнения следует, что увеличение динамического напряжения сдвига τ_0 уменьшает необходимый расход промывочной жидкости, т. е. увеличивает ее несущую способность. В то же время в уравнении не учитывается размер транспортируемых частиц шлама, эксцентриситет кольцевого пространства.

Кашкаровым Н.Г. [2] были проведены экспериментальные исследования влияния реологических параметров промывочной жидкости на очистку нижней зоны горизонтального ствола. При этом движение потока бурового раствора производилось по щелевому каналу, расположенному под углом 26° , нижняя часть которого была заполнена мелкодисперсным шламом диаметром $0,1 - 1,0$ мм. Им было установлено, что размыв мелкодисперсного шлама наиболее интенсивно происходит при условии $\tau_0 / \eta > 150 \text{ с}^{-1}$. В диапазоне τ_0 / η от 1 до 10 с^{-1} толщина смытого слоя шлама δ не превышала 5-6 мм, а с увеличением этого соотношения от 150 до 920 с^{-1} размыв шлама увеличивался до 16-23 мм.

Достаточно детально результаты лабораторных исследований изложены в обзоре фирмы «Drilling fluids Co». Отмечено, что осевший шлам образует «дюны» на наклонном участке ствола скважины. При прекращении циркуляции может наблюдаться быстрое оседание частиц шлама (эффект Байкотта). В результате наиболее сложным с точки зрения выноса шлама и предупреждения прихватов считается участок ствола скважины с зенитным углом в пределах $35 \div 55^\circ$. Однако исследования проводились на установке, имеющей $D_C = 0,1$ м и длину $l = 4,57$ м, что не в полной мере позволяло моделировать граничные условия.

Некоторые авторы для очистки скважины от выбуренной породы рекомендуют периодически прокачивать порции высоковязкого раствора.

Опыт бурения горизонтальных скважин показывает, что расход промывочной жидкости, необходимый для транспортирования шлама в них, принимается в 2-3 раза больше, чем в вертикальных скважинах.

В УГНТУ, Акбулатовым Т.О.[3], была предложена методика расчета промывки горизонтальных скважин, согласно которой, движение частиц шлама по стволу горизонтальной скважины возможно при выполнении двух условий: сила воздействия потока жидкости на частицы шлама в горизонтальной плоскости больше сил сопротивления движению частиц; отсутствие застойных зон в нижней части кольцевого пространства, достигаем при:

$$\tau_0 \leq \Delta P \cdot (D_3 - D_T) / 4l,$$

где D_3 – диаметр замка бурильных труб;

D_T – диаметр бурильных труб;

$\Delta P/l$ – градиент давления вдоль оси скважины.

Силу, с которой поток жидкости увлекает частицу шлама, предложено определять как:

$$F_{Ж} = \tau_{СТ} \cdot S_{ч} = \tau_{СТ} \cdot \pi \cdot d_{ч}^2 / 4,$$

где $\tau_{СТ}$ – касательные напряжения в потоке жидкости у стенки скважины;

$S_{ч}$ – площадь проекции частицы на стенку скважины;

$d_{ч}$ – эквивалентный диаметр частиц шлама.

Однако данная методика нуждается в экспериментальной проверке.

Транспортирование шлама можно улучшить, создавая вибрацию бурильной колонны. Но на практике сложно установить на колонне необходимое количество вибраторов, а значит, этот метод может быть реализован только при небольшой длине горизонтальных участков.

Файн Г.М.[4] на основании обзора зарубежной практики показал широкое распространение УБТ и ЛБТ с винтовым спиральным оребрением. Основная технологическая задача, решаемая с их применением, – уменьшение площади контактной поверхности УБТ или ЛБТ со стенками скважины. Однако неизвестно влияние оребрения труб на транспорт шлама в горизонтальных скважинах.

Из вышеизложенного следует, что вопросы промывки горизонтальных скважин изучены в недостаточной степени. Имеются различные мнения о влиянии реологических параметров промывочных жидкостей, в частности динамического напряжения сдвига, на процесс транспорта шлама. Не изучено влияние эксцентриситета кольцевого пространства, количественное влияние вращения бурильных труб, влияние смазочных добавок, геометрической формы труб, зенитного угла скважины. Это обуславливает то, что экспериментальные исследования данных вопросов необходимо проводить, уделяя серьезное внимание моделированию граничных условий и режимных параметров.

Известно, что при низких градиентах скорости сдвига, характерных для кольцевого пространства скважин, промывочные псевдопластичные жидкости (ППЖ) лучше описываются степенной моделью Оствальда-де-Вааля

$$\tau = k (dU / dr)^m,$$

где (dU / dr) – градиент скорости.

При степенной модели условия моделирования облегчаются. В частности, подобие режимов течения ($Re = idem$) достигается при коэффициенте кинематического подобия:

$$k_U = (1/k_d)^{\frac{m}{2-m}}.$$

Кроме того, при ламинарном режиме течения ППЖ профиль скорости не зависит от величины Re , т.е. режим автомодельный и от ($Re=idem$) можно отказаться.

При использовании ППЖ, описываемой уравнением Оствальда, моделирование частиц шлама облегчается, но даже при $m=0,4$ плотности модельных частиц велики. Указанная трудность была преодолена следующим образом. Известно, что если размер частицы меньше 0,1 размера канала, то она двигается, не испытывая влияния стенок, как в канале бесконечно большого размера. Следовательно, частицы размером:

$$d_{\text{ч}} = 0,05(D_3^M - D_1^M) = 0,05(85 - 64) = 1 \text{ мм},$$

где D_3^M, D_1^M - диаметр замка модели и диаметр трубы модели соответственно, будут двигаться одинаково и в модели, и в натуре (свойства автомодельности).

Известно, что при ламинарном обтекании частиц $Re_{oc} = 1/18Ar$, следовательно, для соблюдения кинематического подобия плотность модельных частиц шлама должна быть: $\rho_{\text{ч}}^M = \rho_{\text{ж}} + \Delta\rho_H \cdot k_u = 1000 + 1200 \cdot 1,26 = 2500 \text{ кг/м}^3$ (ламинарное обтекание)

$$\rho_{\text{ч}}^M = \rho_{\text{ж}} + \Delta\rho_H \cdot k_u^2 = 1000 + 1200 \cdot 1,26^2 = 2900 \text{ кг/м}^3 \text{ (турбулентное обтекание),}$$

где k_u - коэффициент кинематического подобия;

$\Delta\rho_H$ - средняя плотность натуральных частиц.

Проводились эксперименты на лабораторных установках УГНТУ по следующей методике: приготавливалась промывочная жидкость (вода или водный раствор КМЦ); запускали насос и при местной циркуляции (емкость-насос-емкость) в жидкость вводили образцы шлама до объемной концентрации 3%; затем создавалась циркуляция через установку с расходом, при которой не происходило образование осадка в кольцевом пространстве; далее уменьшался расход и фиксировался расход, перепад давления и устанавливалась высота осадка. После осаждения шлама до $\sim 1/3$ диаметра скважины расход увеличивался до полного вымыва осадка, с фиксированием тех же параметров

На рис. 1 [5] показана зависимость высоты осадка в кольцевом пространстве от расхода промывочной жидкости. Эксперимент проводился на установке №2, $D_3=85$ мм, эксцентриситет $e=0,53$, в качестве промывочной жидкости использовался водный раствор КМЦ, с условной вязкостью 30-35 с. В качестве шлама - пропант диаметром $d \approx 1$ мм, $\rho = 3600 \text{ кг/м}^3$. Из графика видно, что при эксцентриситете 0,53 вращение труб позволяет создать в скважине закрутку потока жидкости, приподнимающей шлам, осевший на нижней стенке скважины, и переносящей его в верхнюю широкую часть эксцентричного кольцевого пространства, где осевая скорость потока наиболее высока.

А так же снизить минимально необходимый для транспортирования шлама расход на 30-40% по сравнению с неподвижной колонной. При этом подтверждено ранее известное мнение, что легче не допустить образование осадка, чем его размыть. В то же время они не должны существенно увеличивать потери давления при течении жидкости.

Для изучения влияния вязкости промывочной жидкости на транспортирование шлама были проведены эксперименты при использовании в качестве промывочной жидкости воды и растворов КМЦ с условной вязкостью 25 с и 35 с при разных эксцентриситетах кольцевого пространства.

На рис. 2 [6] показаны результаты опытов по транспортированию пропанта. Во всех опытах было получено, что для транспортировки шлама высоковязкими растворами требуется больший расход последнего. Т.е. он как бы обладает меньшей транспортирующей способностью, чем маловязкие.

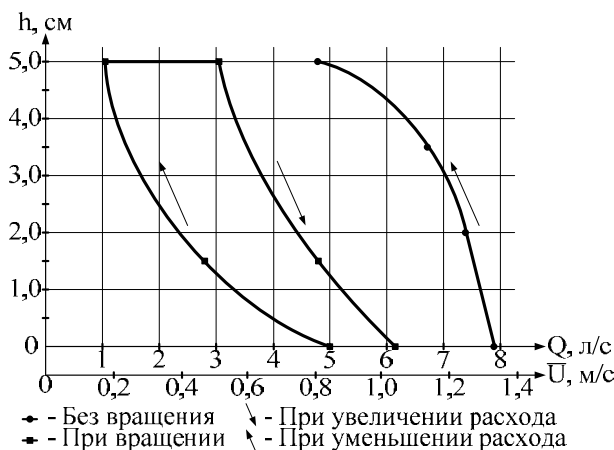


Рис. 1. Зависимость высоты осадка h от расхода промывочной жидкости (водного раствора КМЦ)

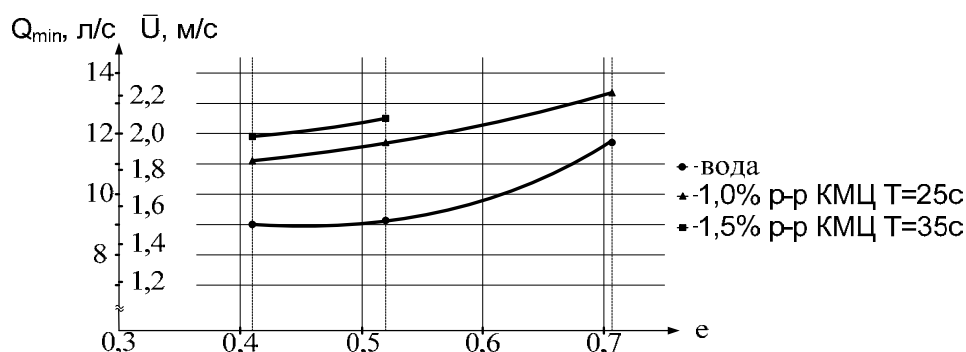


Рис. 2. Влияние эксцентриситета и вязкости раствора на минимально необходимый расход промывочной жидкости

С целью выявления причин, казалось бы, аномального эффекта (влияния высоковязкого раствора на транспортирование шлама) была разработана методика расчета скоростей течения жидкости по окружности эксцентричного кольцевого пространства.

Зависимость скорости течения от размера канала при прочих равных условиях можно выразить как:

$$U \equiv a \cdot h^x,$$

где a - коэффициент пропорциональности;

x - показатель степени, зависящий от реологических параметров и режима течения.

При турбулентном режиме течения в области шероховатых труб $x = 0,5$, в области гладких труб $x = 0,67$. При ламинарном течении ВПЖ (вязкопластичная жидкость), описываемой степенной моделью, $x = (1 + m) / m$.

Ширина кольцевого зазора в эксцентричном кольцевом пространстве (рисунок 3) находится из выражений:

$$h(\phi) = h_0 (1 - e \cos \phi), \quad h_0 = 0,5(D_C - D_T), \quad e = (D_C - D_3) / (D_C - D_T).$$

Элементарный расход:

$$dQ(\phi) = a \cdot U(\phi) \cdot h(\phi) \cdot R_{cp} \cdot d\phi,$$

где средний радиус $R_{cp} = 0,5 \cdot (D_C - D_T)$.

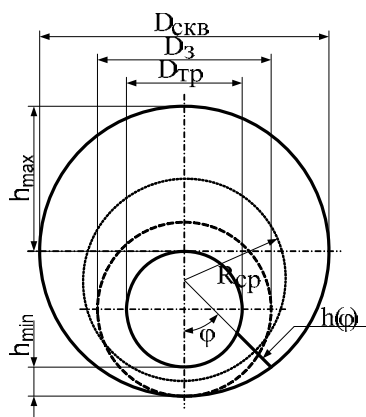


Рис. 3. Изменение величины зазора по окружности эксцентричного кольцевого пространства[6]

Суммарный расход:

$$Q = 2 \int_0^{\pi} dQ = 2a \cdot R_{ср} \int_0^{\pi} h(\phi)^{x+1} d\phi = 2a \cdot R_{ср} \cdot h_0 \int_0^{\pi} (1 - \cos \phi)^{x+1} d\phi.$$

Интеграл $\int_0^{\pi} (1 - \cos \phi)^{x+1} d\phi$ не берется, даже при допущении, что значение x от ϕ

не зависит (т.е. на всех участках кольцевого пространства режим течения жидкости один и тот же). Путем разложения его в ряд Маклорена и ограничиваясь тремя членами (ошибка при этом не превышает 5%) получили распределение относительной скорости течения по окружности эксцентричного кольцевого пространства

$$u_{отн} = \frac{(1 - e \cdot \cos \phi)^x}{\left(1 + e^2 \cdot \frac{x \cdot (x+1)}{4}\right)} \quad (1)$$

Рассчитанное по полученной зависимости распределение скоростей по окружности кольцевого пространства при $e = 0,4$ показано на рис. 4.

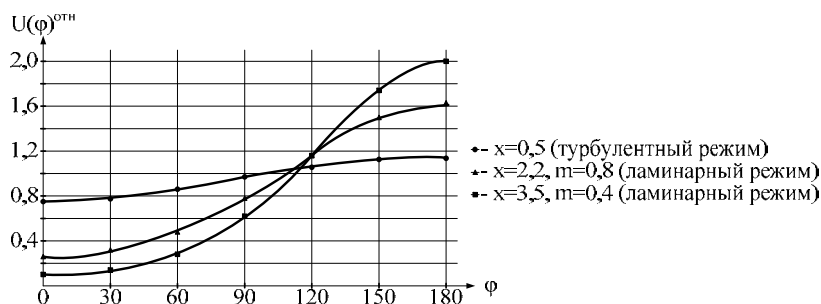


Рис. 4. Распределение скоростей течения жидкости по окружности кольцевого пространства при $e = 0,4$ [6]

Из рисунка видно, что наибольшая разница скоростей течения в широкой и узкой частях кольцевого пространства наблюдается при течении ВПЖ в ламинарном режиме. При этом чем меньше m , тем эта разница больше. Меньшему значению показателя нелинейности m соответствует высокое значение динамического напряжения сдвига раствора, с увеличением τ_0 уменьшается относительная скорость движения жидкости в узкой части эксцентричного кольцевого пространства. При турбулентном течении разница скоростей значительно меньше.

Рассчитанные в соответствии с зависимостью (1) значения скоростей течения в наиболее узкой части кольцевого пространства $U_{\phi=0}$ для экспериментов, приведенных на рисунке 2, показаны на рис. 5.

Из него следует, что растворы с повышенной вязкостью обладают более высокой несущей способностью. Транспортирование шлама осуществляется ими при меньшей скорости течения в нижней части кольцевого пространства. Но из-за высокого значения динамического напряжения сдвига скорость их течения в нижней наиболее узкой части кольцевого пространства значительно меньше, чем растворов с низким динамическим напряжением сдвига при одном и том же расходе.

Это обстоятельство и обуславливает необходимость в повышенном расходе жидкости с большим значением τ_0 , по сравнению с жидкостью с меньшим значением τ_0 .

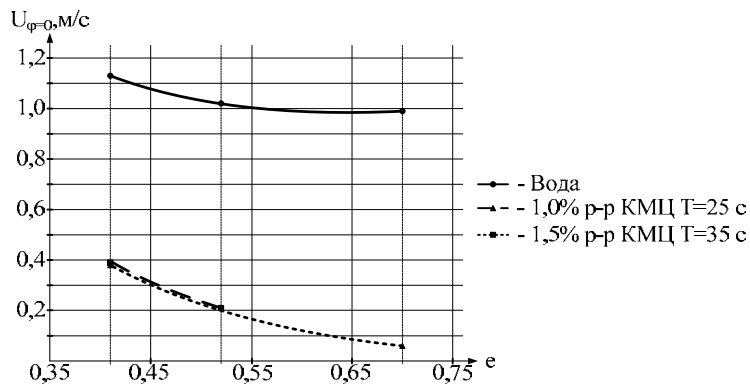


Рис. 5. Зависимость незаляющей скорости в наиболее узкой части кольцевого пространства от свойств жидкости и эксцентриситета при транспортировании пропанта[6]

Поскольку зенитный угол существенно влияет на вынос выбуренной породы из скважины, проводились исследования по влиянию зенитного угла на транспортирование шлама в скважине.

Результаты экспериментов показаны на рис. 6.

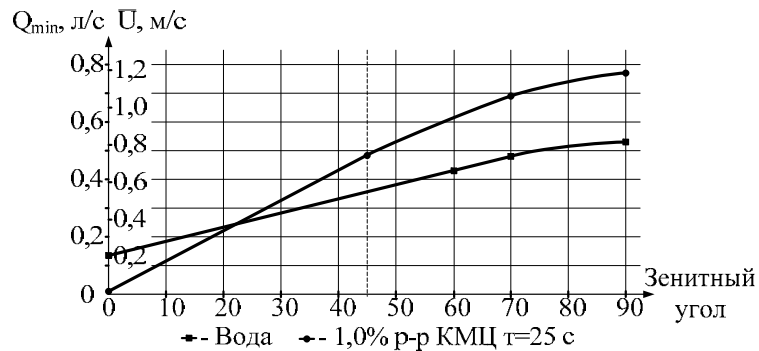


Рис. 6. График зависимости минимально необходимого расхода промывочной жидкости для выноса шлама от зенитного угла при эксцентриситете $e=0,7$ [6]

Вышеизложенные исследования является основой для проектирования режимов промывок при строительстве скважин. Из этих исследований вытекает, что:

1. Повышение условной вязкости промывочной жидкости, связанное с высоким динамическим напряжением сдвига (низким m), ухудшает транспортирование шлама в эксцентричном кольцевом пространстве.

2. Разработанная в лаборатории УГНТУ математическая модель распределения скорости течения жидкости в эксцентричном кольцевом пространстве позволяет рассчи-

тать необходимый расход промывочной жидкости при различных эксцентриситетах, реологических параметрах и режимах течения промывочной жидкости.

Л и т е р а т у р а

1. Особенности технологии промывки горизонтальных скважин. Ч.1. Крылов В.И., Крецул В.В. Нефтяное хозяйство. 2001. № 6. С. 36.
2. Кашкаров Н.Г. Исследование механизма реодинамического эффекта эфиров целлюлозы при высоких напряжениях сдвига в потоке бурового раствора /С.П. Исаев, Н.Г. Кашкаров, Р.Д. Нагимов, О.В. Шумилкина// Бурение и нефть, № 5 – 2007 – С. 27-30.
3. Акбулатов Т.О. Совершенствование промывки – путь к повышению технико-экономических показателей проводки горизонтальных скважин / Т.О. Акбулатов, И.А. Хабибуллин, Р.А. Карамов, М.В. Костров //Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. - №10. – С. 10-13.
4. Файн Г.М. Нефтяные трубы из легких сплавов / Г.М. Файн // УДК 622.24.053.6 – 1990. – С.219
5. Акбулатов Т.О. Моделирование лабораторной установки по исследованию процессов транспортирования выбуренной породы при проходке горизонтальных участков скважин / Т.О. Акбулатов, И.А. Хабибуллин //Территория нефтегаз. – 2007. - №12. - С.18-21
6. Хабибуллин И.А. О распределении скоростей течения псевдопластичных жидкостей в эксцентричном кольцевом пространстве / И.А. Хабибуллин, Т.О. Акбулатов // Материалы 57-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. – Кн. 1. – С. 186 – 188.

References

1. Osobennosti tehnologii promyvki gorizonta'nyh skvazhin. Ch.1. Krylov V.I., Krecul V.V. Neftjanoe hozjajstvo. 2001. № 6. S. 36.
2. Kashkarov N.G. Issledovanie mehanizma reodinamicheskogo jeffekta jefirov celljulozy pri vysokih naprjazhenijah sdviga v potoke burovogo rastvora /S.P. Isaev, N.G. Kashkarov, R.D. Nagimov, O.V. Shumilkina// Burenie i neft', № 5 – 2007 – S. 27-30.
3. Akbulatov T.O. Sovershenstvovanie promyvki – put' k povysheniju tehniko-jekonomicheskijh pokazatelej provodki gorizonta'nyh skvazhin / T.O. Akbulatov, I.A. Habibullin, R.A. Karamov, M.V. Kostrov //Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. – 2008. - №10. – S. 10-13.
4. Fajn G.M. Neftjanye truby iz legkih splavov / G.M. Fajn // UDK 622.24.053.6 – 1990. – S.219
5. Akbulatov T.O. Modelirovanie laboratornoj ustanovki po issledovaniju processov transportirovanija vyburennoj porody pri prohodke gorizonta'nyh uchastkov skvazhin / T.O. Akbulatov, I.A. Habibullin //Territorija neftegaz. – 2007. - №12. - S.18-21
6. Habibullin I.A. O raspredelenii skorostej techenija psevdoplastichnyh zhidkostej v jekscen-trichnom kol'cevom prostranstve / I.A. Habibullin, T.O. Akbulatov // Materialy 57-j nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2006. – Kn. 1. – S. 186 – 188.

Planning of the modes of washings at building of mining wells for the deposits of slate gas is taken to planning of the modes of washings at wiring horizontal and directional wells on oil and gas.

Б.Н. Локотюк – д.т.н., проф. Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

М.А. Милостян – аспирант Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа (г. Ивано-Франковск).

Рецензент: Ульшин В.А., д.т.н., проф., заведующий кафедрой системной инженерии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВИНТОВЫХ ВОЛНОВЫХ КАЛИБРОВ ЧАШЕЧНЫМИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ.

У статті розсмотрени технологічні особливості обробки валкових калібрів наведені режими різання та деякі види конструкцій різальних інструментів металорізальні верстати та матеріали.

Ключові слова: гвинтовий калібр, різальних інструменті, металорізальні верстати, матеріали.

Одним из существенных, но еще в значительной степени не используемых резервов повышения производительности процесса обработки точением рабочих поверхностей винтовых волновых калибров (ручьев), стойкости режущей кромки, является использование на чистовой операции вращающихся чашечных резцов.

Обработка резанием заготовок типа валов чашечными вращающимися резцами имеет определенные преимущества по сравнению с обработкой фасонными или невращающимися круглыми чашками.

При точении чашечными вращающимися резцами взаимодействия, режущей кромки резца и обрабатываемой поверхности, существенно изменяется, а именно, вместо трения скольжения характерного для существующих методов обработки, происходит трение качения.

На чистовой операции точения рабочих поверхностей винтовых волновых калибров (ручьев) рекомендуется использовать чашечные принудительно вращающиеся резцы.

Наружный диаметр чашечного лезвия соответствует профилю ручья. Имеется в виду, что радиус профиля ручья равен радиусу чашечного резца. Необходимо также отметить, что стойкость режущей кромки чашечные вращающегося резца выше стойкости невращающегося инструмента в 3 – 5 раз. Это достигается за счет непрерывного вращения чашечного резца обеспечивающего контакт каждой точки режущей кромки с обрабатываемой поверхностью за значительный короткий период времени, по сравнению с периодом, когда она не находится в контакте с обрабатываемой заготовкой. В результате этого режущая кромка охлаждается, что значительно повышает ее стойкость и создает условия для обработки высокопрочных сплавов. Опыт применения чашечных резцов с непрерывно вращающейся режущей кромкой показал, что их конструктивные элементы и геометрические параметры в значительной мере зависят от способа приведения инструмента во вращение, схемы установки оси резца относительно оси заготовки, а также направления вращения инструмента.

Известно два способа приведения во вращение чашечного резца: самовращение – резец вращается под действием сил трения, возникающего между инструментом и обрабатываемой заготовкой; принудительное вращение резца от отдельного привода или от механизма станка.

Преимущество самовращающихся резцов состоит в их компактности и простоте инструмента.

Однако недостаток самовращающихся резцов значителен – нестабильность вращения режущей кромки, зависимость частоты вращения инструмента от режимов резания и геометрических параметров режущей части резца. Нестабильность вращения режущей кромки как следствие приводит к снижению стойкости инструмента, повышения сил резания и как следствие понижению качества обрабатываемой поверхности.

Вследствие вышеизложенного целесообразно применение чашечные резцов с принудительным вращением, - стабильность вращения, равномерный износ режущей кромки по всему периметру режущего лезвия, сравнительно низкие усилия резания. Как следствие получение в течении длительного времени обрабатываемой поверхности вы-

сокого качества. Помимо этого точение принудительно вращающимися чашечными резцами позволяет выбирать оптимальные значения частот вращения заготовки и инструмента, устанавливать необходимые углы скрещивания осей обрабатываемой детали и инструмента.

В зависимости от ориентации режущей кромки инструмента относительно вектора главного движения различают две главные схемы установки резца (рис. 1 и рис. 2). При установке резца по схеме, указанной на рис. 1а большой торец чашечного резца выполняет роль передней поверхности. Основным параметром, определяющим режим обработки по указанной схеме установки инструмента, является угол скрещивания осей инструмента и заготовок γ .

Положение режущего инструмента по схеме установки рис. 1б, определяется тем, что роль передней поверхности, по которой сходит стружка, выполняет боковой поверхности.

Положение инструмента по второй схеме установки рис. 2 ориентировано в пространстве двумя корректирующими углами γ и $\beta_{\text{доп}}$.

Угол γ является определяющим т.к. он создает благоприятные условия для вращения режущей кромки. Дополнительный угол наклона $\beta_{\text{доп}}$ относительно горизонтальной оси способствует установке необходимого угла между плоскостью резания и задней поверхностью инструмента. Угол $\beta_{\text{доп}}$ оказывает существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности.

В зависимости от расположения оси инструмента с непрерывно вращающейся режущей кромкой относительно оси обрабатываемой заготовки каждая из схем резания подразделяется еще на две – прямую и обратную.

При прямой установке чашечного резца его ось наклонена относительно направления подачи, то есть к направлению подачи обращена передняя поверхность резца. При обратной установке резца к направлению подачи обращена задняя поверхность резца.

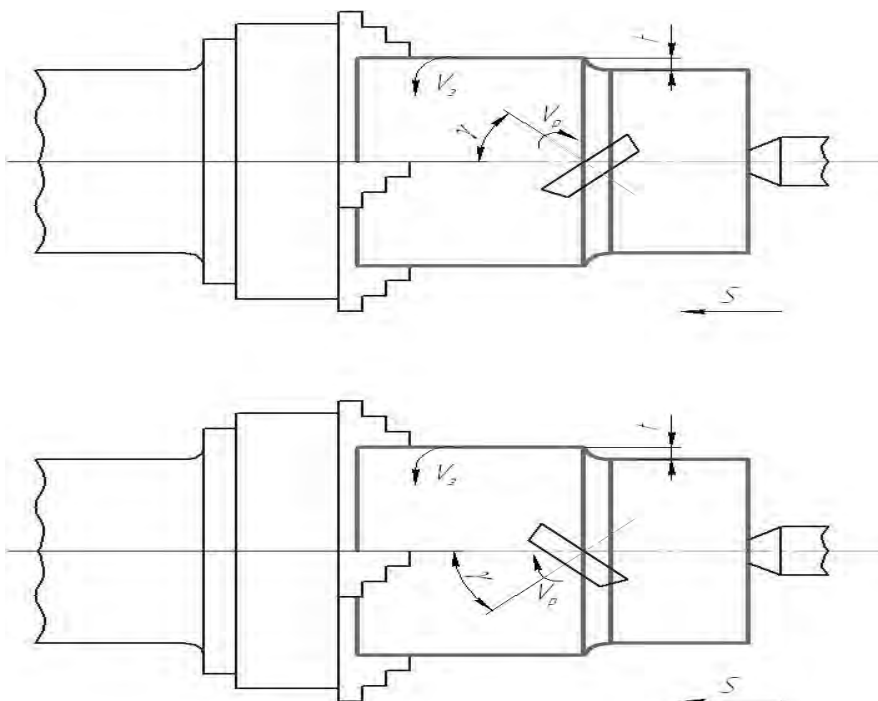


Рис. 1. Схемы установки чашечного резца по оси обрабатываемой заготовки

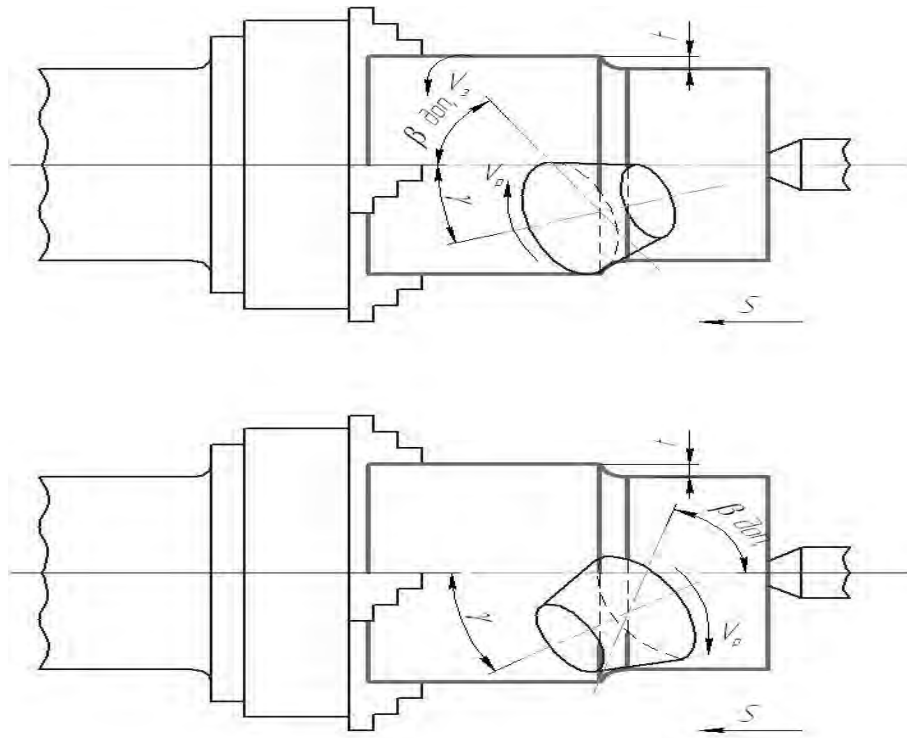


Рис. 2. Схемы установки чашечного резца ниже оси обрабатываемой заготовки

Однако в нашем конкретном случае обработку рабочих поверхностей ручьев винтовых волновых калибров целесообразно внести по первой схеме установки при прямом резании рис. 1 а.

Анализируя рис. 1 а. можно отметить, что основными геометрическими параметрами влияющими на процесс обработки является диаметр чашечного резца, а также угол скрещивания оси чашечного резца и оси вала. Диаметр резца непосредственно связан с геометрическими параметрами рабочей поверхности винтовых волновых калибров. Диаметр режущего лезвия чашечного резца должен быть равен или несколько меньше диаметра впадины вала. Это требование обусловлено тем, что бы не вышли за пределы заданного размера геометрических показателей рабочих витков. Угол скрещивания осей γ является показателем от которого зависит такая величина как скорость скольжения и скорость перекатывания, а также угол между вектором относительной скорости скольжения и направлением следов резания. Эти показатели оказывают существенное влияние на качество обработанной поверхности, а также на весь процесс резания в целом. Наиболее благоприятные условия резания будут в том случае, если скорость скольжения стремится к своему максимальному значению, скорость перекатывания и угол между вектором скорости скольжения и следами резания – к минимуму.

На эти параметры существенное влияние оказывают диаметр чашечного резца, диаметр обрабатываемой детали и угла скрещивания осей детали и инструмента.

Благодаря этому появляется возможность управлять процессом обработки за счет выбора оптимальных значений угла скрещивания γ_c .

Заключение

Сделано предположение, что процессом обработки рабочих ручьев винтовых волновых калибров можно управлять. При этом достигается высокое качество обработанной поверхности. Это может быть достигнуто за счет подбора оптимальных значений угла скрещивания осей чашечного резца и волнового калибра. В результате этого уста-

новятся максимальные значения скорости скольжения и минимальные значения скорости перекачивания.

Л и т е р а т у р а

1. Гун А.С., Соколов В.Е., Огарков Н.Н. Обработка прокатных валков М.: Металлургия , 1983. -112 с.
2. Северденко В.П., Бахтинов Ю.Б, Бахтинов В.Б Валки для профильного проката. М.: Металлургия , 1979. -224 с.
3. Мелконов Л.Д. К вопросу сил резания при точении круглыми принудительно вращающимися резцами - Ворошиловград , 1981. бс.- Рукопись представлена Ворошиловградским машиностроительным институтом. Деп. в УкрНИИТИ 2 февр. 1981, № 2640.
4. Мелконов Л.Д. Исследование влияния угла скрещивания и режимов резания на качество и точность обработанной поверхности чашечным принудительно вращающимся резцом – В сб. Прогрессивные конструкции режущих инструментов и рациональные условия их эксплуатации. – М. : 1983, с. 34 – 38.

References

1. Gun A.S., Sokolov V.E., Ogarkov N.N. Obrabotka prokatnyh valkov M.: Metallurgija , 1983. - 112 s.
2. Severdenko V.P., Bahtinov Ju.B, Bahtinov V.B Valki dlja profil'nogo prokata. M.: Metallurgija , 1979. -224 s.
3. Melkonov L.D. K voprosu sil rezanija pri tochenii kruglymi prinuditel'no vrawaju-wimisja rezcami - Voroshilovgrad , 1981. bs.- Rukopis' predstavlena Voroshilovgradskim ma-shinostroitel'nyim institutom. Dep. v UkrNIINTI 2 fevr. 1981, № 2640.
4. Melkonov L.D. Issledovanie vlijanija ugla skrewivaniija i rezhimov rezanija na kachestvo i tochnost' obrabotanoj poverhnosti chashechnym prinuditel'no vrawajuwimsja rezcom – V sb. Progressivnye konstrukcii rezhuvih instrumentov i racional'nye uslovija ih jekspluatcii. – М. : 1983, s. 34 – 38.

Melkonov L.D.

Technology's options of

In the article the essence technological system and method of processing role caliber were subjected and was brought cutting conditions and design of cutting tools machines and materials and equipments.

Keywords: *Processing caliber cutting tools machines materials equipments technological.*

Мелконов Леонід Дмитрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри ПОМСІ Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Рецензент: *Гутько Ю.І.*, д.т.н., професор, завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ВОЛНОВЫХ КАЛИБРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРОВ

У статті уточнено сутність та методи обробки валкових калібрів наведені режими різання та деякі види конструкцій різальних інструментів металорізальні верстати та матеріали.

Ключові слова: гвинтовий калібр, різальних інструменті, металорізальні верстати, матеріали.

В настоящее время обработка винтовых волновых калибров осуществляется на специальных токарных станках.

Все станочное оборудование для механической обработки прокатных валков подразделяется на основное и вспомогательное.

К основному технологическому оборудованию относятся станки, используемые непосредственно в технологическом процессе изготовления винтовых волновых калибров. К вспомогательному оборудованию относятся станки, предназначенные для изготовления, заточки инструмента, приспособлений и т.д.

Рассматривая технологию изготовления винтовых волновых калибров необходимо подробно остановиться на материалах из которого они изготавливаются, а также рассмотреть предлагаемые режимы резания для их обработки. Помимо материала и режимов обработки необходимо составить перечень металлорежущего оборудования, участвующего непосредственно в процессе обработки. Из литературных источников (Г.С. Гун) известно, что для обработки волновых калибров используются металлорежущие станки:

1. Токарные станки для центровки винтовых волновых калибров.
2. Токарные станки для черновой обточки.
3. Токарные станки для чистовой обработки.
4. Фрезерные станки для фрезеровки шпоночных пазов.
5. Шлифовальные станки для шлифовки валка.

Винтовые калибровочные валки для производства шаров для шарикоподшипников и мельничных шаров.

Материал - с содержанием хрома и никеля (хромоникелевые валки СПХН -59, СПХН -62, СПХН -65) литые чугунные калибровочные винтовые валки.

Материал инструмента – ВК8, ВК6, ВК4, ВК3.

Режим резания: НВ – 400-480 СПХН-62

Обточка рабочей поверхности

$$\begin{aligned} \text{с продольной подачей:} \quad v, \text{ м/с} &= \frac{0,08 - 0,1}{0,15} \\ S_{\text{мм/об}} &= \frac{1,5 - 2,5}{3,5 - 4,0} \\ t, \text{ мм} &= \frac{3,0 - 3,5}{3,0 - 4,0} \end{aligned}$$

Обточка рабочей поверхности

$$\text{с поперечной подачей:} \quad v, \text{ м/с} = \frac{0,08 - 0,1}{0,1 - 0,12}$$

$$S \text{ мм/об} = \frac{0,25 - 0,4}{0,25 - 0,4}$$

$$t, \text{ мм} = \frac{30}{30}$$

Обточка неробочих
поверхностей:

$$v, \text{ м/с} = 0,22 - 0,3$$

$$S \text{ мм/об} = 0,8 - 1,2$$

$$t, \text{ мм} = 20 - 30$$

Отрезка валка

$$v, \text{ м/с} = 0,2 - 0,23$$

$$S \text{ мм/об} = 0,3 - 0,5$$

$$t, \text{ мм} = 30$$

В числителе – режимы обработки для точения валков ”по корке”, в знаменателе – ”после корки”.

На каждом заводе, изготавлиющем винтовые волновые калибры, осуществляют свой технологический процесс, отличающийся от других некоторыми техническими особенностями. Каждый технологический процесс ведут на основании разработанных технологических инструкций и операционных карт.

Винтовые волновые калибры широкого применения для изготовления двутавров, рельсов шаров для шарикоподшипников и шаровых мельниц.

Подробно рассмотрим технологию изготовления винтовых волновых калибров работающих по принципу поперечного проката, при производстве шаров. Схема процесса представлена на рисунке 1. Круглый пруток задается в непрерывно вращающиеся валки, на боковой поверхности которых нарезаны винтовые калибры, имеющие обратный профиль по отношению к прокатываемому изделию. Прокатка сплошных изделий осуществляется на двухволновом стане. Передний конец прутка захватывается ребордами валков, начинает вращаться и, передвигаясь по оси калибра, постепенно обжимается, приобретая форму шара.

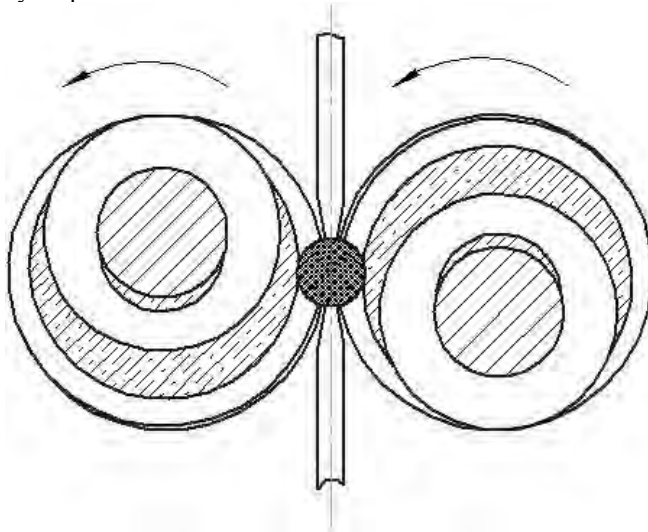


Рис. 1. Схема прокатки шаров

В конце калибра изделие отделяется от тела прутка и выбрасывается из винтовых волновых калибров. В это же время передние реборды валков захватывают новую партию металла и процесс формообразования осуществляется непрерывно до тех пор пока не закончится весь пруток.

Как отмечалось ранее винтовые волновые калибры применяются для прокатки шаров. Технология изготовления валков, применяемая на заводе фирмы ООО «ШПС» следующая.

Заготовку прокатного вала на первой операции подвергают центровке. Для этого используются специальный фрезерно-центровальный станок.

В начале с двух сторон одновременно фрезеруются торцы, а затем также одновременно с двух сторон, на второй позиции, сверлятся два центровочных отверстия.

После этого заготовка передается на токарный станок. Модель станка выбирается в зависимости от диаметра и длины обрабатываемого валка.

На токарном станке предварительно протачивают шейки и бочку вала, начерно. Так как к прокатываемым шарам предъявляются повышенные требования по точности и шероховатости обработки поверхности, то и валы должны быть изготовлены с достаточно высокой точностью. Поэтому чистовую обработку шеек и бочки вала ведут на другом станке аналогичной модели с использованием люнетов.

Следующим шагом по обработке винтовых поверхностей шаропркатных валков является использование специализированного токарного оборудования. В конструкцию универсальных токарных станков модели 1А660; 1А661; 1Н63; 1Н65; РТ-117 и т.д. вносятся изменения, позволяющие обрабатывать винтовую поверхность. Этими конструктивными изменениями являются разработанные и установленные на станок копировальные механизмы. В конструкцию копировальных механизмов входят копировальные кулачки или линейные копиры. Процесс точения винтовых волновых калибров сводится к следующим технологическим операциям: 1 – черновую 2- чистовую.

Для чернового точения используются специальные фасонные резцы для черновой обработки ручьев валков (Рис.2).

Фасонные резцы представляют из себя твердосплавные пластины ВК8; ВКЗН напаянные на державку.

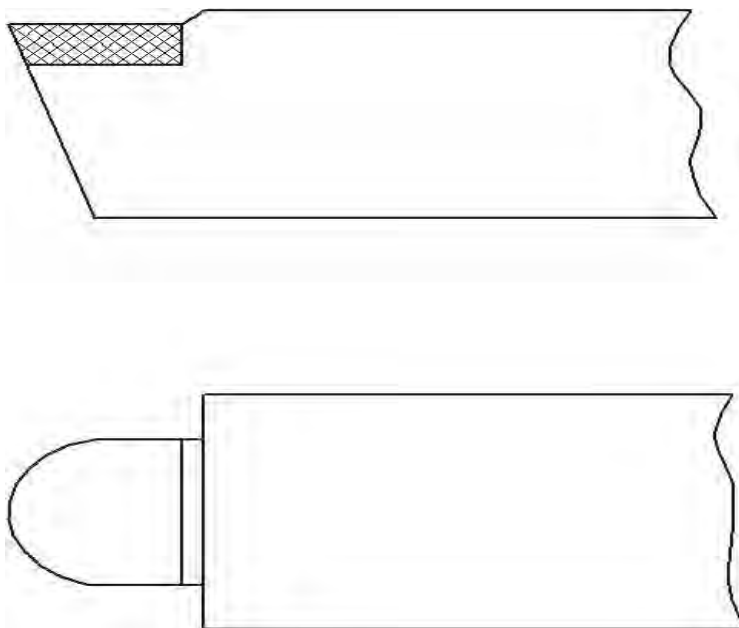


Рис. 2. Фасонный резец

Для чистового точения волновых ручьев используются чашечные резцы, представляющие из себя чашечные пластины. (Рис. 3)

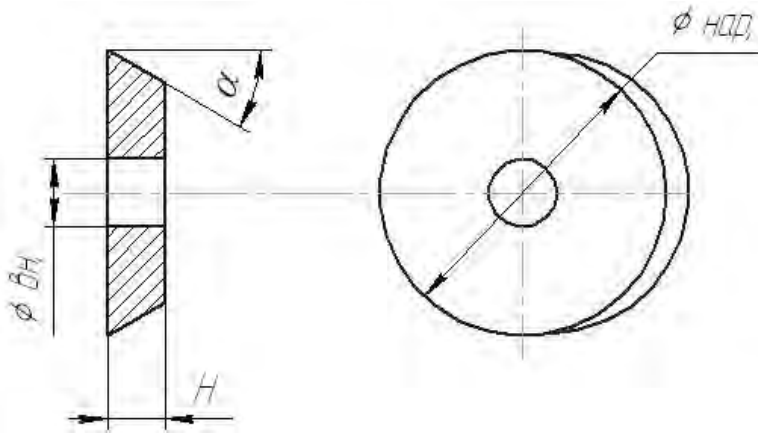


Рис. 3. Чашечная пластина

Эти чашечные пластины устанавливаются неподвижно на резцедержку и жестко к ней крепятся. Необходимо отметить, что для каждого профиля ручьев винтовых волновых калибров применяются чашечные пластины определенных размеров, а именно диаметр базового отверстия, наружный диаметр, высота пластины и углы пластины.

Данная конструкция режущего инструмента позволяет достаточно точно изготавливать винтовые ручьи шаропрокатных валков.

Чашечные резцы позволяют вести обработку рабочих чашечных ручьев калибров с достаточно высокой точностью и чистотой обработанной поверхности. Точность обработки составляет 6-8 квалитет, а шероховатость поверхности находится в пределах $Ra = 1,6 - 3,2$ мкм.

Токарную обработку винтовых поверхностей рабочих ручьев шаропрокатных калибров ведут чашечными резцами до полного соответствия контуров ручья шаблону.

Однако метод применения в качестве режущего инструмента круглых чашечных пластин имеет ряд существенных недостатков: значительные силы и температура в зоне резания; высокие вибрации; большие силы резания значительно снижают стойкость режущего инструмента, а иногда приводят к разрушению режущей кромки.

Вследствии низкой стойкости чашечных пластин приходится останавливать процесс обработки и выводить из зацепления с заготовкой резец.

После вывода резца из зоны резания отпускают винты крепления пластины и поворачивают ее на угол $90^{\circ} - 95^{\circ}$ - позволяющие ввести в процесс обработки неизношенные участки лезвия. Затем резец, посредством механизма копира, возвращают назад на 1-2 витка, сообщают вращения заготовки и вводят с ней в зацепление новый участок лезвия чашечного резца.

Такой схеме технологической обработки рабочих ручьев присуща не высокая производительность при изготовлении винтовых волновых калибров.

Большим резервом повышения производительности труда при чистовом точении рабочих ручьев винтовых волновых калибров является применение чашечных резцов с вращающейся режущей кромкой.

Существуют два метода вращения режущей кромки – самовращение и принудительное вращение.

Необходимо отметить, что применение самовращающихся резцов не целесообразно из-за нестабильного вращения.

Нестабильность вращения возникает из-за постоянного контакта правой и левой реборд, что в свою очередь приводит к торможению и остановке резца. Частые остановки и торможения ведут к резкому износу и «прижогам» рабочей кромки.

Потому применение принудительно вращающихся резцов позволяет избежать подобных неприятностей. К основным преимуществам чашечных принудительно вращающихся резцов можно отнести следующие: стабильность вращения режущей кромки

инструмента, независимое направление вращения инструмента от вращения заготовки; обеспечение оптимальной величины вращения режущей кромки инструмента, оптимизация режимов резания.

Заклучение

В заключение можно отметить, что значительным резервом повышения производительности труда при чистовом точении рабочих ручьев винтовых волновых калибров является использование для этой цели принудительно вращающихся чашечных резцов.

Литература

1. Гун А.С., Соколов В.Е., Огарков Н.Н. Обработка прокатных валков М.: Металлургия, 1983. -112 с.
2. Северденко В.П., Бахтинов Ю.Б., Бахтинов В.Б. Валки для профильного проката. М.: Металлургия, 1979. -224 с.
3. Целиков А.И., Барбарич М.В., Васильчиков М.В., Грановский С.П., Жуневич-Стоша Е.А. Специальные прокатные станы М.: Металлургия, 1971. -336 с
4. Мелконов Л.Д. Принудительное вращающийся чашечный резец - М.: Машиностроение, №3, 1980. с. 19
5. Мелконов Л.Д. Точение по методу обкатки – В кн. : «Автомобильная промышленность», №4, 1981, с. 29

References

1. Gun A.S., Sokolov V.E., Ogarkov N.N. Obrabotka prokatnyh valkov M.: Metallurgija, 1983. -112 s.
2. Severdenko V.P., Bahtinov Ju.B, Bahtinov V.B Valki dlja profil'nogo prokata. M.: Metallurgija, 1979. -224 s.
3. Celikov A.I., Barbarich M.V., Vasil'chikov M.V., Granovskij S.P., Zhunevich-Stosha E.A. Special'nye prokatnye stany M.: Metallurgija, 1971. -336 s
4. Melkonov L.D. Prinuditel'noe vrawajuwijjsja chashechnyj rezec - M.: Mashinostroenie, №3, 1980. s. 19
5. Melkonov L.D. Tochenie po metodu obkatki – V kn. : «Avtomobil'naja promyshlennost'», №4, 1981, s. 29

У статті уточнено сутність та методи обробки валкових калібрів наведені режими різання та деякі види конструкцій різальних інструментів металорізальні верстати та матеріали.

Ключові слова: гвинтовий калібр, різальних інструменті, металорізальні верстати, матеріали.

In the article the essence and method of processing role caliber were subjected and was brought cutting conditions and design of cutting tools machines and materials.

Keywords: Processing caliber cutting tools machines materials.

Мелконов Леонід Дмитрійович– к.т.н., доц. кафедри ПОМСІ Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Гутько Ю.І., д.т.н., проф., завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИНЕМАТИКИ 4-Х ШПИНДЕЛЬНОЙ ШЛИФО-ПОЛИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ

В статье представлена модель кинематического движения шпиндельной установки. Отображены выражения кинематических показателей, оказывающих основное влияние на оптимизацию частот вращения. Отображено влияние частот вращения на численные значения скорости скольжения.

Ключевые слова: шпиндельная установка, шлифо - полировальная установка, микронеровность, скольжение.

Для подтверждения полученной математической модели проводим предварительный эксперимент. Режимы резания для проведения предварительных экспериментов выбираем из литературных источников. Частота вращения шпинделя с заготовкой устанавливается $N_{min}=100-1400$ об/мин, частота вращения всей установки $N_{ус}=50$ об/мин.

Увеличение частот вращения каждого из 4-х шпинделей установки от 100 до 700 об/мин в начальный момент приводит к резкому уменьшению величины шероховатости обработанной поверхности от $Ra=1.5$ мкм до $Ra=0.55$ мкм. Дальнейшее увеличение частоты вращения шпинделя от $n_{mp}=700$ об/мин до 900 об/мин приводит к незначительному снижению шероховатости обработанной поверхности ($Ra=0.55$ мкм до $Ra=0.5$ мкм).

Это объясняется тем, что увеличение частоты вращения 4-х шпинделей в начальный период от 100 об/мин до 600 об/мин приводит к резкому уменьшению шероховатости обработанной поверхности за счет увеличения относительной скорости скольжения. В пределах частот вращения $N_{min}=600-900$ об/мин скорость скольжения, между вектором относительной скорости скольжения и направлением следов резания стремятся к своим оптимальным значениям, то есть в этом случае участке наименьшая высота шероховатости, то есть в этом случае оптимальные условия резания. С увеличением частоты вращения $N_{min}=1300$ об/мин наблюдается незначительное увеличение скорости скольжения, резкое возрастание скорости перекачивания и угла между вектором относительной скорости и следов резания в два раза, вследствие этого высота шероховатости увеличивается до $Ra=0.8$ мкм. Для объективной оценки расхождения теоретических и экспериментальных данных результаты проверочных наблюдений обрабатываем в существующей методике (1). Серии экспериментов состоят из опытов для каждой.

Обработку результатов измерений проводим в следующем порядке:

1. Определяем среднее значение частоты вращения из n измерений

$$\bar{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_{un} c_i$$

2. Находим погрешность отдельных измерений

$$\Delta n_{un} = \bar{n}_{un} - n_{un}$$

3. Определяем среднюю квадратичную погрешность, результат серии измерений

$$\Delta S n_{un} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta n_{un} i)^2}{n(n-1)}}$$

4. Оценка относительных расхождений экспериментальных и теоретических данных производим по формуле

$$\Delta = \frac{\bar{n}_{un} - n_{un}}{\bar{n}_{un}} \cdot 100\%$$

Проведя обработку полученных результатов по описанной выше методике, устанавливаем, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 2%.

Таким образом, предложенные теоретические положения для определения кинематических показателей вполне приемлемы для проведения дальнейших экспериментальных исследований.

R_a

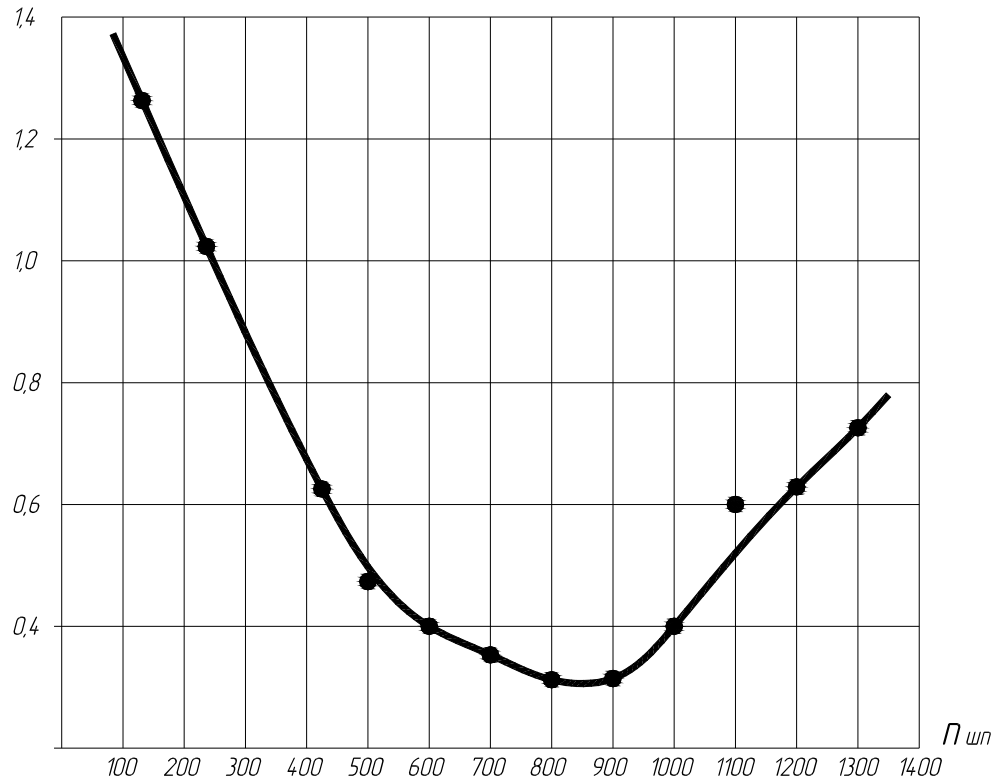


Рис. 1. Зависимость высоты микронеровностей R_a от частоты вращения шпинделя $n_{шп}$

Выводы:

1. В результате проведенных математических разработок определена математическая модель кинематического движения шпиндельной установки.

2. Выведены выражения кинематических показателей, оказывающих основное влияние на оптимизацию частоты вращения.

3. Установлено влияние частоты вращения на численные значения скорости скольжения. С увеличением частоты вращения $n_{шп}=100-700$ об/мин скорость скольжения увеличивается примерно в два раза. При дальнейшей частоты вращения скорость скольжения остается практически неизменной. Обрабатываемых заготовок от min к max приводит к увеличению скорости скольжения, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности и точности изделия.

4. Исследования скорости перекатывания показывает, что при минимальных значениях частот вращения она минимальна, с увеличением скорости увеличивается примерно в 2-3 раза. С увеличением диаметра изделия скорость перекатывания уменьшается, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на процессе обработки.

5. В результате проведения предварительного эксперимента наименьшая высота микронеровностей $R_a=0,55$ мкм будет при частоте вращения шпинделей, равном $n_{шп}=600-900$ об/мин

Л и т е р а т у р а

1. Каплан Н.А. «Высшая математика», Москва 1969.-754с.
2. Литвин Ф.Л. «Теория зубчатых зацеплений», Москва 1968.-526с.
3. Бурштейн И.С., Бабичев О.П., Ходош Б.Б. «Об'ємна вібраційна обробка», Москва, 1970. – 215с.
4. А.с.Україна №38253, МП В24 В 31 /031 опубл. 2001р.
5. Бернік П.С., Ярошенко Л.В. «Вібраційні технологічні машини з просторовим коливанням робочих органів», Вінниця 1988. – 116с.

References

1. Kaplan N.A. «Vysshaja matematika», Moskva 1969.-754s.
2. Litvin F.L. «Teorija zubchatyh zaceplenij», Moskva 1968.-526s.
3. Burshtejn I.S., Babichev O.P., Hodosh B.B. «Ob'emna vibracijna obrobka», Moskva, 1970. – 215s.
4. A.s.Ukraina №38253, MP V24 V 31 /031 opubl. 2001r.
5. Bernik P.S., Jaroshenko L.V. «Vibracijni tuhnologichni mashini z prostorovim kolivannjam robochih organiv», Vinnicja 1988. – 116s.

Г.Л. Мелконов, Л.Д. Мелконов, В.А. Плахотнік

Експериментальна перевірка математичної моделі кінематики 4-х шпіндельної шліфо-поліровальної машини

У статті запропоновано модель кінематичного руху шпіндельної машини. Відображені вирази кінематичних показників, що чинять основний вплив на оптимізацію частот обертання. Відображений вплив частот обертання на числові значення швидкості ковзання.

Ключові слова: шпіндельна машина, шліфо-поліровальна машина, мікронерівність, ковзання.

Мелконов Г.Л. – старший викладач Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ);

Мелконов Л.Д. – канд. техн. наук, доцент Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ);

Плахотнік В.А. - канд. техн. наук, доцент Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Гутько Ю.І., д.т.н., професор, завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

УДК 621.831

В.Н. Стрельников, Ю.В. Стрельников

г. Краматорск

ИССЛЕДОВАНИЕ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА ЧЕРВЯЧНОГО КОЛЕСА

Для червячной передачи общего вида получены уравнения боковых поверхностей зубьев червячного колеса в параметрической и координатной форме, определены контрольные параметры зубьев, что необходимо для нарезки зубьев на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: червяк, кривизна, поверхность, нормаль.

В тяжелом машиностроении преобладает единичное и мелкосерийное производства, отличающиеся не высокой производительностью труда, более длительными производственными циклами и более высокими издержками производства. Для снижения производственных затрат вынужденно прибегают к менее дорогостоящим и часто низкоэффективным технологическим процессам. Так, из – за высокой стоимости, сложности и трудоемкости изготовления червячных фрез [1], при единичном и мелкосерийном производстве крупномодульных червячных колес, зубофрезерование заменяется мало-

производительным методом [2], с использованием фасонного резца на оправке – «летучки», с тангенциальной подачей [3].

На рис. 1 показана нарезка зубьев червячного колеса резцом – летучкой: модуль зубьев $m = 36,3822$ мм, число зубьев $z_2 = 31$, делительный диаметр $d_2 = 1309$ мм, масса 1100 кг. Сопрягаемый червяк архимедов, $z_1 = 1$.

Низкая жесткость и повышенный износ режущей кромки фасонного резца, снижают точность технологического процесса нарезки зубьев крупных червячных колес резцом – летучкой. Подобные технологические процессы отличаются низкой производительностью, высокой трудоемкостью, низким качеством поверхностей зубьев, требующей специальной приработки.

Решение важной производственной задачи, касающейся разработки высокопроизводительного способа формообразования зубьев крупномодульных червячных колес, обеспечивающего заданную точность, при одновременном снижении их себестоимости, требует принципиально новых научно - технических подходов, основанных на использовании технологических возможностей современного оборудования. При этом возникает необходимость в разработке математических моделей, формируемых зубьев, а также программного продукта, адаптированного к рабочей программе станка.

Боковые поверхности витков червяка и зубьев колеса, участвующие в зацеплении, при передаче вращательного движения должны находиться в непрерывном взаимном касании. [4, 5] В рассматриваемой нами червячной передаче общего вида предусмотрен линейный контакт рабочих поверхностей червяка и зубьев колеса. Поэтому относительное движение таких поверхностей может осуществляться при условии их взаимногибания [6, 7].

Для исследование зацепления червячной передачи будем пользоваться декартовыми системами координат правого направления: x, y, z – неподвижная система координат, x_1, y_1, z_1 – подвижная система координат, жестко связанная с червяком, x_2, y_2, z_2 – подвижная система координат, жестко связанная с червячным колесом (рис. 2). Оси z и z_1 направлены вдоль оси червяка, а ось z_2 – вдоль оси червячного колеса. Неподвижную систему координат x', y', z' можно получить путем поступательного перемещения системы координат x, y, z вдоль оси x на величину межосевого расстояния $-a$ [8].

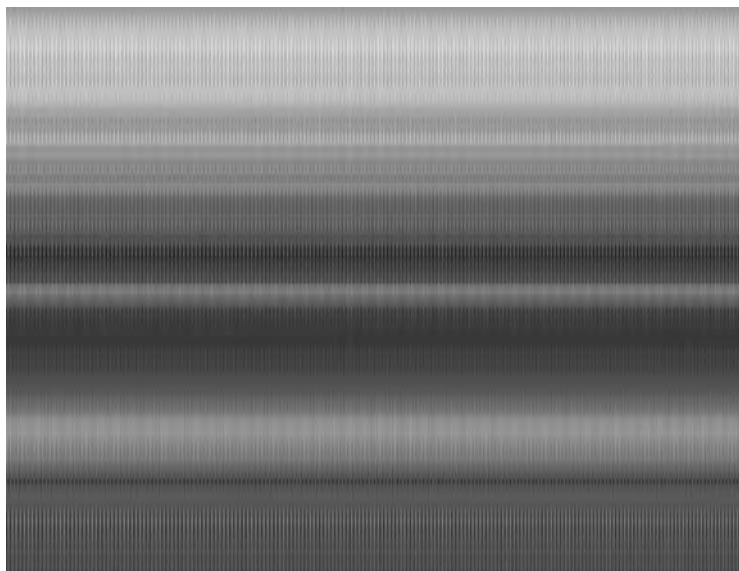


Рис. 1. Нарезка зубьев на заготовке червячного колеса фасонным резцом – летучкой

Координаты некоторой точки в различных системах отсчета, например x, y, z и x_1, y_1, z_1 обладают аналитической связью

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1, \\ y &= x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1, \\ z &= z_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

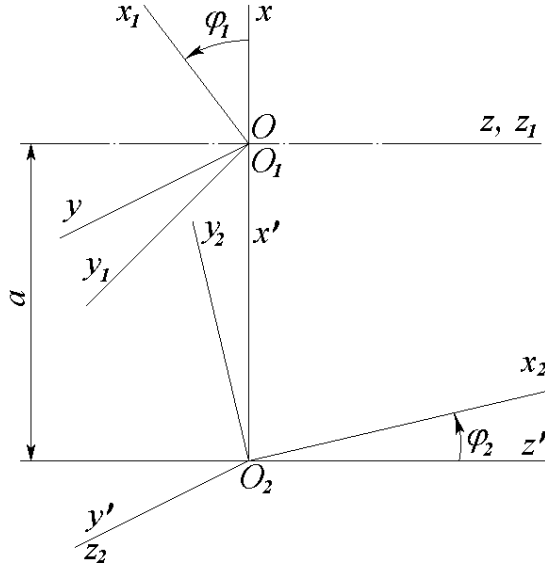


Рис. 2. Принятые системы координат определяющие расположение элементов червячной пары

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x \cos \varphi_1 + y \sin \varphi_1, \\ y_1 &= -x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1, \\ z_1 &= z. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Установим связь между системами координат x, y, z и x_2, y_2, z_2

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= (x + a) \sin \varphi_2 + z \cos \varphi_2, \\ y_2 &= (x + a) \cos \varphi_2 - z \sin \varphi_2, \\ z_2 &= y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= x_2 \sin \varphi_2 + y_2 \cos \varphi_2 - a, \\ y &= z_2, \\ z &= x_2 \cos \varphi_2 - y_2 \sin \varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Поверхность червяка общего вида зададим с помощью некоторой плоской кривой линии AOB , совпадающей с осевым сечением поверхности червяка (рис. 3). Система координат x_1, y_1, z_1 жестко связана с заготовкой червяка. Для построения осевого профиля червяка выбирается подвижная система координат ξ, η, ζ , совершающая винтовое движение относительно оси z_1 , совпадающей с осью заготовки.

Начало координат O системы ξ, η, ζ расположено на стыке правой OA и левой OB частей образующей граней витка червяка, на некотором цилиндре, радиус которого

равен ρ . Ось ζ параллельна оси z_1 и совпадает с образующей указанного цилиндра. Образующая кривая AOB лежит в координатной плоскости η, ζ .

Выразим координаты ξ, η, ζ через x_1, y_1, z_1

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x_1 \cos \nu + y_1 \sin \nu, \\ \eta &= -x_1 \sin \nu + y_1 \cos \nu - \rho, \\ \zeta &= z_1 - p\nu. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

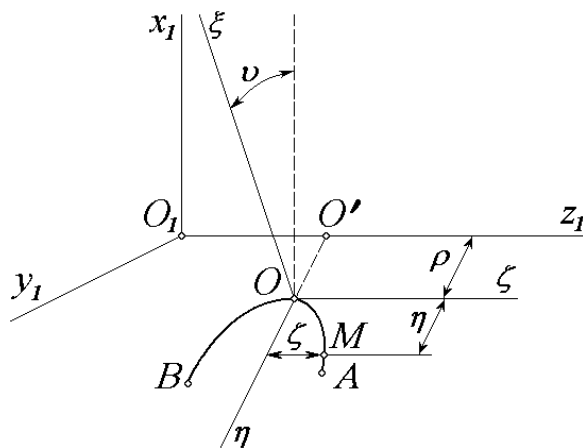


Рис. 3. Представление образования поверхности червяка

Координаты x_1, y_1, z_1 представим через ξ, η, ζ

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \xi \cos \nu - (\eta + \rho) \sin \nu, \\ y_1 &= \xi \sin \nu + (\eta + \rho) \cos \nu, \\ z_1 &= p\nu + \zeta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Связь между параметрами η и ν , характерная для точек контакта, определяется равенством

$$\frac{p}{i} - a + (\eta + \rho) \sin(\nu + \varphi_1) + (p\nu + \zeta) \left[\frac{p}{\eta + \rho} \cos(\nu + \varphi_1) + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \sin(\nu + \varphi_1) \right] = 0. \quad (7)$$

Уравнения (6) ($\xi = 0$) и (7), совместно, определяют семейство контактных линий на поверхности червяка общего вида.

Представляя уравнение (7) относительно параметра ν , получим значение ν_{12} , удовлетворяющее уравнению (7)

$$\nu_{12} = \frac{1}{p} \left[-\zeta - \frac{\frac{p}{i} - a + (\eta + \rho) \sin(\nu + \varphi_1)}{\frac{p}{\eta + \rho} \cos(\nu + \varphi_1) + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \sin(\nu + \varphi_1)} \right]. \quad (8)$$

На основе контактных линий, описываемых уравнениями (6) и (7), получим параметрические уравнения поверхности зацепления червячной передачи общего вида

$$\left. \begin{aligned} x &= -(\eta + \rho)\sin(\nu + \varphi_1), \\ y &= (\eta + \rho)\cos(\nu + \varphi_1), \\ z &= \frac{a - \frac{p}{i_{21}} - (\eta + \rho)\sin(\nu + \varphi_1)}{\frac{p}{\eta + \rho}\cos(\nu + \varphi_1) + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta}\sin(\nu + \varphi_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Уравнения поверхности зацепления червячной передачи общего вида можно выразить и в координатной форме. Воспользуемся системой уравнений (9), из которой получим ряд необходимых зависимостей

Из системы уравнений (9) получим ряд зависимостей:

$$\begin{aligned} \eta &= \sqrt{x^2 + y^2} - \rho, \\ \sin(\nu + \varphi_1) &= -\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \\ \cos(\nu + \varphi_1) &= \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} &= \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x} \cdot \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{y} \cdot \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом значений (10) и (11) из уравнений (9) получим уравнение поверхности зацепления червячной передачи в координатной форме

$$z = \frac{a - \frac{p}{i_{21}} + x}{\frac{p y}{x^2 + y^2} - \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x}}. \quad (12)$$

Когда известен закон относительного движения сопряженных звеньев ($i = const$) с взаимногибаемыми рабочими поверхностями, определены уравнения поверхности зацепления в параметрической (9) и координатной форме (12), в соответствии с методом Х. И. Гохмана [5] можно найти искомые уравнения боковых поверхностей зубьев червячного колеса. По формулам (3) параметрические уравнения поверхности зацепления (9) выразим в подвижной системе координат x_2, y_2, z_2 , жестко связанной с червячным колесом, и после преобразований получим параметрические уравнения боковых поверхностей зубьев червячного колеса

$$\left. \begin{aligned}
 x_2 &= [a - (\eta + \rho) \sin(\nu + \varphi_1)] \sin \varphi_2 + \frac{\left[a - \frac{p}{i_{21}} - (\eta + \rho) \sin(\nu + \varphi_1) \right] \cos \varphi_2}{\frac{p}{\eta + \rho} \cos(\nu + \varphi_1) + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \sin(\nu + \varphi_1)}, \\
 y_2 &= [a + (\eta + \rho) \cos(\nu + \varphi_1)] \cos \varphi_2 - \frac{\left[a - \frac{p}{i_{21}} - (\eta + \rho) \sin(\nu + \varphi_1) \right] \sin \varphi_2}{\frac{p}{\eta + \rho} \cos(\nu + \varphi_1) + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \sin(\nu + \varphi_1)}, \\
 z_2 &= (\eta + \rho) \cos(\nu + \varphi_1).
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Уравнения боковых поверхностей зубьев червячного колеса можно представить в координатной форме. Для этого воспользуемся системой параметрических уравнений (13), в которые подставим значения η , $\cos(\nu + \varphi_1)$, $\sin(\nu + \varphi_1)$ из уравнений (10) и после преобразований получим уравнения боковых поверхностей зубьев червячного колеса в координатной форме

$$\left. \begin{aligned}
 x_2 &= (a + x) \sin \varphi_2 + \frac{y(x^2 + y^2)(xi_{21} + ai_{21} - p) \cos \varphi_2}{i_{21} \left[p y^2 - x(x^2 + y^2) \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]}, \\
 y_2 &= (a + y) \cos \varphi_2 - \frac{y(x^2 + y^2)(xi_{21} + ai_{21} - p) \sin \varphi_2}{i_{21} \left[p y^2 - x(x^2 + y^2) \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]}, \\
 z_2 &= y.
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Углы φ_1 и φ_2 связаны между собой законом относительного движения сопряженных звеньев, выражающемся через постоянство заданного передаточного отношения червячной передачи $\varphi_2 = i_{21} \varphi_1$. Если ввести обозначение $\nu_{12}(x, y) + \varphi_1 = \vartheta$, то $\varphi_2 = i_{21} [\vartheta - \nu_{12}(x, y)]$, где угол $\nu_{12}(x, y)$ вычисляется по формуле (8), а угол φ_2 в данном случае рассматривается как угол обкатки взаимоогibaемых поверхностей.

В соответствии с формулой (8) можно записать

$$\nu_{12}(x, y) = \frac{1}{p} [-\zeta(x, y) + z], \quad \text{или} \quad \varphi_1 = \vartheta - \nu_{12}(x, y) = \vartheta + \frac{1}{p} [\zeta(x, y) - z],$$

где угол ϑ определяется из системы уравнений (10), аппликата z вычисляется по формуле (12). Учитывая полученные зависимости, выражение угла φ_2 , использующегося в системе уравнений (14), примет вид

$$\varphi_2 = i_{21} \left\{ \vartheta + \frac{1}{p} [\zeta(x, y) - z] \right\}. \quad (15)$$

Для получения уравнений профиля зуба в торцевом сечении червячного колеса, за начало отсчета удобно принять положение сечения торцевой плоскостью, проходящей через полюс зацепления червячной передачи. В этом случае в уравнениях профиля зуба в торцевом сечении вместо текущего значения угла φ_2 , определяемого по формуле (15), следует принимать угол φ_{2T} , учитывающий положение исходной точки отсчета в полюсе зацепления, где внешний диаметр червяка имеет минимальную величину, а угол обкатки принимает некоторое значение φ_{2p}

$$\varphi_{2T} = \varphi_2 - \varphi_{2p} = i_{21}(\varphi_1 - \varphi_{1p}) = i_{21}(\vartheta - \nu_{12} - \varphi_{1p}). \quad (16)$$

Для полюса зацепления имеем: $x = -r_p$; $y = 0$; $z = 0$. В соответствии с формулами (10), (12) и (15) определим значение угла φ_{1p} , входящего в формулу (16)

$$\varphi_{1p} = \frac{3}{2}\pi + \frac{\zeta_p(x, y)}{p}, \quad (17)$$

где $\zeta_p(x, y)$ – значение функции $\zeta(x, y)$ в полюсе зацепления.

Для установления толщины зуба червячного колеса по начальной окружности, т. е. протяженности соответствующей дуги, ограниченной смежными профилями зуба, отметим следующее:

- толщина зуба червячного колеса по начальной окружности S_k измеряется в главной плоскости, когда $y = 0$;
- при обкатке начальных цилиндров колеса и червяка, теоретический зазор в зацеплении равен нулю;
- толщина зуба червячного колеса по начальной окружности S_k равна ответной осевой ширине впадины червяка измеренной в направлении образующей начального цилиндра червяка.

На основании изложенного, можно представить осевой шаг червяка t при условии беззазорного червячного зацепления

$$t = S_p + S_k, \quad (18)$$

где S_p – осевая толщина витка червяка, измеренная на начальном цилиндре.

Толщина зуба червячного колеса по начальной окружности

$$S_k = (t - S) + (S - S_p) = t - S + 2[\zeta_S(\eta) - \zeta_{S_p}(\eta)], \quad (19)$$

где $\zeta_S(\eta)$, $\zeta_{S_p}(\eta)$ – выражения функции $\zeta(\eta)$, для различных значений параметра η , т. е. при $\eta = r - \rho$ и $\eta = r_p - \rho$, соответственно.

ЗАО «НКМЗ» разработан на Visual Basic for Applications (VBA) макрос для «Solid Works», позволивший создать трехмерную математическую модель смежных поверхностей зубьев червячного колеса в системе координат, связанных со станком, и граничными условиями, налагаемыми полем червячного зацепления.

На основе полученной трехмерной математической модели смежных поверхностей зубьев червячного колеса и установленных граничных условий, посредством ПО

«CIMATRON» разработана управляющая программа к станку с ЧПУ «TOS VARNSDORF», обеспечивающая заданный режим нарезки зубьев червячного колеса (рис. 2): модуль $m = 38$ мм, число зубьев $z_2 = 49$, делительный диаметр $d = 1862$ мм, число витков сопрягаемого червяка $z_1 = 3$, масса 2120 кг (рис. 4).

Материал зубчатых венцов червячных колес – бронза БрА9Ж3Л ГОСТ493 - 79. В качестве инструмента используется торцовая фреза с твердосплавными пластинами, режущие кромки спрофилированы по дуге окружности. Достигнуто снижение трудоемкость нарезки зубьев в 1,6 ... 2 раза, в зависимости от модуля и числа зубьев червячного колеса, повышена точность и чистота поверхностей зубьев.

Управляющая программа к станку «TOS VARNSDORF» для нарезки зубьев на червячном колесе разработана на основе обобщенного метода построения программного продукта, созданного на ЗАО «НКМЗ».

Использование универсальных станков с ЧПУ для нарезки зубьев крупных червячных колес, позволило существенно сократить протяженность производственного цикла, снизить трудоемкость зуборезных операций, повысить точность и качество червячных передач. В течение текущего года планируется нарезать на станках с ЧПУ порядка 20 крупных червячных колес.



Рис. 4. Нарезка зубьев торцовой фрезой на станке с ЧПУ «TOS VARNSDORF»

Л и т е р а т у р а

1. Колчин Н. И. Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений. – М. – Л.: Машгиз, 1949. – 210 с.
2. Колчин Н. И., Литвин Ф. Л. Методы расчета при изготовлении и контроле зубчатых изделий. – М. – Л.: Машгиз, 1952. – 269 с.
3. Литвин Ф. Л. Новые виды цилиндрических червячных передач. – М. – Л.: Машгиз, 1962. – 103 с.
4. Грубин А. Н. Червячное зацепление. – М.: Оргметалл. – 1936. – 190 с.
5. Гохман Х.И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа. – Одесса. – 1886. – 232 с.
6. Niemann G., Heyer E. Untersuchungen an Schneckengetrieben – «VDI», 1953, № 6, с. 147 – 157.
7. Литвин Ф. Л., Корышев И. К. Вопросы геометрии и технологии червячных передач с вогнутым профилем червяка // Прогрессивные методы производства и технологичность конструкций. – М.: ГОСИНТИ, 1960. – С. 91 – 101.
8. Кривенко И. С. Исследование червячных передач с новой геометрией // Зубчатые и червячные передачи. – М. – Л.: Машгиз, 1959. – С. 5 – 73.

References

1. Kolchin N. I. Analiticheskiy raschet ploskih i prostranstvennyh zaceplenij. – M. – L.: Mashgiz, 1949. – 210 s.
2. Kolchin N. I., Litvin F. L. Metody rascheta pri izgotovlenii i kontrole zubchatyh iz-delij. – M. – L.: Mashgiz, 1952. – 269 s.
3. Litvin F. L. Novye vidy cilindricheskikh chervjachnyh peredach. – M. – L.: Mashgiz, 1962. – 103 s.
4. Grubin A. N. Chervjachnoe zaceplenie. – M.: Orgmetall. – 1936. – 190 s.
5. Gohman X.I. Teorija zaceplenij, obobwennaja i razvitaja putem analiza. – Odessa. – 1886. – 232 s.
6. Niemann G., Heyer E. Untersuchungen an Schneckengetrieben – «VDI», 1953, № 6, с. 147 – 157.
7. Litvin F. L., Koryshev I. K. Voprosy geometrii i tehnologii chervjachnyh peredach s vognutym profilem chervjaka // Progressivnye metody proizvodstva i tehnologichnost' konstruk-cij. – M.: GOSINTI, 1960. – S. 91 – 101.
8. Krivenko I. S. Issledovanie chervjachnyh peredach s novoj geometriej // Zubchatye i chervjachnye peredachi. – M. – L.: Mashgiz, 1959. – S. 5 – 73.

В.М. Стрельников, Ю.В. Стрельников

Дослідження бічної поверхні зуба черв'ячного колеса

Для черв'ячної передачі загального вигляду отримані рівняння бічних поверхонь зубів черв'ячного колеса в параметричній і координатній формі, визначені контрольні параметри зубів, що необхідно для нарізки зубів на верстатах з ЧПУ.

Ключові слова: черв'як, кривизна, поверхня, нормаль.

V.N. Strelnikov, Yu.V. Strelnikov

Research of side of tooth of worm-wheel

For the worm-gear of general view equalizations of sides of points of worm-wheel are got in a self-reactance and co-ordinate form, the control parameters of points are certain, that it is necessary for cutting of points on machine-tools with CHPU.

Key words: spiral gear, curvature, a surface, a normal.

В.Н. Стрельников – д.т.н., ПАО «НКМЗ» (г. Краматорск);

Ю.В. Стрельников – аспирант (г. Краматорск).

Рецензент: *Шишов В.П.*, д.т.н., проф. кафедри "Машиноведение" Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 621.831

Ю.В. Стрельников

г. Краматорск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ВИТКА ЧЕРВЯКА ОБЩЕГО ВИДА

Получены выражения, определяющие основные критерии кривизны поверхности витка червяка общего вида, а также радиусы кривизны плоских сечений.

Ключевые слова: червяк, кривизна, образующая, поверхность.

Червячная передача принципиально отличается от других передач зацеплением: расположением осей, геометрическими формами и кинематикой элементов зацепления, температурным режимом, применяемыми конструкционными и смазочными материалами. Большому износу подвержены зубья червячного колеса. Преимущественно возникает усталостное выкрашивание зубьев, реже – их поломка, т. к. зубья червячного колеса обладают сравнительно низкой контактной прочностью в отношении их прочностью на изгиб.

Червячные передачи при высоких нагрузках склонны к заклиниванию [1]. Невысокий к.п.д. и большое тепловыделение в зацеплении, существенно ограничивают использование червячных передач по уровню передаваемой мощности [2].

Решение задачи повышения нагрузочной способности и к.п.д. червячных передач привело к появлению более совершенных геометрических форм рабочих поверхностей с вогнутым червяком [3 – 5]. Другое положительное решение эта задача нашла в работе В. А. Попова [6].

Современные потребности тяжелого машиностроения вызывают необходимость более значительного повышения технических характеристик червячных передач.

Рассмотрим поверхность, заданную уравнением между текущими координатами, т. е. геометрическое место точек, координаты которых удовлетворяют уравнению [7, 8]

$$F(x, y, z) = 0. \quad (1)$$

Ограничимся заведомо обыкновенными точками, такими, в которых, по крайней мере, одна из частных производных F_x, F_y, F_z отлична от нуля. Вблизи такой точки уравнение (1) можно переписать в виде, разрешенном относительно одной координаты, например [9, 10]

$$z = f(x, y), \quad (2)$$

что дает ясное представление о поведении поверхности.

Представим вектор – функцию \vec{r} двух скалярных аргументов u, v , рассматриваемых в некоторой области их изменения

$$\vec{r} = \vec{r}(u, v) = x(u, v)\vec{i} + y(u, v)\vec{j} + z(u, v)\vec{k}, \quad (3)$$

где x, y, z – координаты вектор – функции \vec{r} , они также являются функциями скалярных аргументов u, v .

Вектор $\vec{r}(u, v)$ откладывается из начала координат, конец этого вектора, который будем обозначать через M , имеет своим радиус – вектором

$$\vec{r} = \vec{r}(u, v) \quad (4)$$

и своими координатами

$$\left. \begin{aligned} x &= x(u, v), \\ y &= y(u, v), \\ z &= z(u, v). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Когда u, v проходят область своего изменения, точка M с радиус – вектором (4), или с координатами (5), описывает геометрическое место точек, определяющее некоторую поверхность в параметрическом представлении, т. е. каждой паре значений u, v из области их изменения отвечает точка поверхности. Поверхность будем рассматривать в бесконечно малом, вблизи какой – либо ее точки $M(u, v)$. Любая другая точка поверхности M' будет расположена в дифференциальной окрестности точки $M(u, v)$.

В теории поверхностей кривизна нормального сечения поверхности плоскостью, проходящей через нормаль к поверхности, определяется отношением квадратичных форм Гаусса [11]: второй квадратичной формы II к первой I

$$\kappa = \frac{II}{I} = \frac{L du^2 + 2M du dv + N dv^2}{E du^2 + 2F du dv + G dv^2}, \quad (6)$$

где $E = E(u, v)$, $F = F(u, v)$, $G = G(u, v)$ – коэффициенты первой квадратичной формы; $L = L(u, v)$, $M = M(u, v)$, $N = N(u, v)$ – коэффициенты второй квадратичной формы.

Следуя Гауссу [11], определим

$$E = \bar{r}_u^2 = 1 + f_x^2, \quad F = \bar{r}_u \bar{r}_v = f_x f_y, \quad G = \bar{r}_v^2 = 1 + f_y^2, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\bar{r}_{uu} \bar{r}_u \bar{r}_v}{\sqrt{(\bar{r}_u \times \bar{r}_v)^2}} = \frac{\bar{r}_{uu} \bar{r}_u \bar{r}_v}{\sqrt{EG - F^2}} = \frac{f_{xx}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}}, \\ M &= \frac{\bar{r}_{uv} \bar{r}_u \bar{r}_v}{\sqrt{EG - F^2}} = \frac{f_{xy}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}}, \\ N &= \frac{\bar{r}_{vv} \bar{r}_u \bar{r}_v}{\sqrt{EG - F^2}} = \frac{f_{yy}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где \bar{r}_u , \bar{r}_v , \bar{r}_{uu} , \bar{r}_{uv} , \bar{r}_{vv} и f_x , f_y , f_{xx} , f_{xy} , f_{yy} – частные производные вектор – функции \bar{r} и функции $z = f(x, y)$ по соответствующим скалярным аргументам u , v и параметрам x , y [12].

Кривизна поверхности κ в точке M может быть положительной или отрицательной, в зависимости от знака второй квадратичной формы, первая квадратичная форма всегда положительна.

Возьмем плоскость, проходящую через орт нормали к поверхности $\bar{n} = \bar{n}(u, v)$ и через выбранное направление касательной. Эта плоскость пересечет поверхность по линии нормального сечения поверхности. Плоскость сечения будет соприкасающейся плоскостью этой линии, главная нормаль последней \bar{v} или совпадает с ортом нормали к поверхности \bar{n} ($\sigma = 0$), или противоположна ей ($\sigma = \pi$) [13].

Радиус кривизны нормального сечения поверхности R *положительный*, если главная нормаль сечения \bar{v} совпадает с нормалью к поверхности \bar{n} , ($\sigma = 0$, $r = R$), и *отрицательный*, если главная нормаль сечения \bar{v} противоположно направлена орту \bar{n} ($\sigma = \pi$, $-r = R$). Здесь r представляет радиус кривизны линии нормального сечения поверхности, а σ – угол, образованный главной нормалью \bar{v} линии нормального сечения поверхности с ортом нормали \bar{n} к поверхности.

Полную картину распределения кривизны нормальных сечений поверхности в определенной точке M дает индикатриса Дюпена. Кривизна нормальных сечений поверхности в каждой точке (кроме омбилических) имеет два экстремальных значения. Направления, в которых кривизна нормального сечения поверхности в данной точке имеет минимум и максимум, совпадают с направлениями главных диаметров индикатрисы Дюпена и, следовательно, они взаимно перпендикулярны. Эти направления представляют *главные направления* на поверхности в точке M . Нормальные сечения поверхности (L_1) и (L_2), проведенные в главных направлениях, являются главными сечениями

поверхности. Кривизны $\kappa_1 = \frac{1}{R_1}$, $\kappa_2 = \frac{1}{R_2}$ главных сечений называются главными кривизнами поверхности в точке M .

Радиус кривизны $R = \frac{1}{\kappa}$ произвольного нормального сечения поверхности (L) выражается через главные радиусы кривизны R_1 и R_2 формулой Эйлера

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \varphi}{R_1} + \frac{\sin^2 \varphi}{R_2}, \quad (9)$$

где φ – угол между плоскостями нормальных сечений (L) и (L_1).

Частные производные функции $z = f(x, y)$ по параметрам x, y в уравнениях (7) и (8) получим дифференцированием уравнения винтовой поверхности червяка

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{\partial z}{\partial x} = p \frac{\partial g}{\partial x} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x}, \\ f_y &= \frac{\partial z}{\partial y} = p \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y}, \\ f_{xx} &= \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = p \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial x^2}, \\ f_{xy} &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = p \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial x \partial y}, \\ f_{yy} &= \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = p \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial y^2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Частные производные угла g по параметрам x, y установим с помощью формул [14]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial x} &= -\frac{y}{x^2 + y^2}, \\ \frac{\partial g}{\partial y} &= \frac{x}{x^2 + y^2}, \\ \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} &= \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}, \\ \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} &= \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}, \\ \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} &= -\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Подставляя значения частных производных (10) и (11) в уравнения (7) и (8), получим коэффициенты первой и второй квадратичной форм Гаусса для поверхности червяка общего вида

$$\left. \begin{aligned} E &= 1 + \left[-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right]^2, \\ F &= \left[-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right] \left[p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right], \\ G &= 1 + \left[p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]^2, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{p \left(\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial x^2} \right)}{\sqrt{1 + \left(-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right)^2}}, \\ M &= \frac{p \left(\frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial x \partial y} \right)}{\sqrt{1 + \left(-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right)^2}}, \\ N &= \frac{-p \left(\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta(x, y)}{\partial y^2} \right)}{\sqrt{1 + \left(-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right)^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В точке M на поверхности F зададим два различных направления: дифференциалы, отвечающие одному из них, обозначим du, dv ; дифференциалы, отвечающие другому, пусть будут $\delta u, \delta v$. Запишем орты $d\vec{r}$ и $\delta\vec{r}$, соответствующие этим направлениям

$$d\vec{r} = \frac{\vec{r}_u du + \vec{r}_v dv}{\sqrt{E du^2 + 2F du dv + G dv^2}}, \quad (14)$$

$$\delta\vec{r} = \frac{\vec{r}_u \delta u + \vec{r}_v \delta v}{\sqrt{E \delta u^2 + 2F \delta u \delta v + G \delta v^2}}. \quad (15)$$

Из уравнений (14), (15) найдем угол между направлениями $\frac{du}{dv}$ и $\frac{\delta u}{\delta v}$

$$\cos(d\vec{r}, \delta\vec{r}) = \frac{E du \delta u + F(du \delta v + dv \delta u) + G dv \delta v}{\sqrt{E du^2 + 2F du dv + G dv^2} \cdot \sqrt{E \delta u^2 + 2F \delta u \delta v + G \delta v^2}}. \quad (16)$$

Угол φ между координатными линиями в некоторой точке $M(x, y)$ на поверхности витка червяка

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{\left[-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right] \left[\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]}{\sqrt{\left\{ 1 + \left[-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right]^2 \right\} \left\{ 1 + \left[p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\}}}, \\ \sin \varphi &= \frac{\sqrt{\left\{ 1 + \left[-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right]^2 \right\} + \left[\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]^2}}{\sqrt{\left\{ 1 + \left[-p \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial x} \right]^2 \right\} \left\{ 1 + \left[p \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\}}}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $dy \neq 0, dx = 0 \Rightarrow$ смещение по линии y ;
 $dx \neq 0, dy = 0 \Rightarrow$ смещение по линии x .

Кривизна нормального сечения поверхности в общем случае зависит от выбранного направления $dy:dx$, кроме омбилических точек. В главном направлении величина κ должна иметь экстремальное значение.

При бесконечно малом смещении из точки $M(u, v)$ по поверхности $\vec{r}(u, v)$, сам радиус – вектор $\vec{r}(u, v)$ и орт нормали $\vec{n}(u, v)$ получают приращения, главные части которых выражаются дифференциалами [13]

$$\left. \begin{aligned} d\vec{r} &= \vec{r}_u du + \vec{r}_v dv, \\ d\vec{n} &= \vec{n}_u du + \vec{n}_v dv. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Оба дифференциала $d\vec{n}$ и $d\vec{r}$ лежат в касательной плоскости точки M' . Если бесконечно малое смещение осуществляется в главном направлении, то векторы $d\vec{n}$ и $d\vec{r}$ коллинеарны и имеет место формула Родрига [12], выражающая необходимое и достаточное условие существования главных направлений и главных кривизн в рассматриваемой точке поверхности

$$d\vec{r} + R d\vec{n} = 0, \quad (19)$$

где $d\vec{r}$ – идет по любому из главных направлений на поверхности;

R – главный радиус кривизны по соответствующему главному направлению.

В равенство (19) подставим развернутые выражения слагаемых и после преобразований получим квадратное уравнение относительно $dy:dx$, решая его, определим два вещественных различных корня, отвечающих двум взаимно ортогональным бесконечно малым смещениям по главным направлениям в каждой точке поверхности червяка общего вида

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{1,2} = \frac{- \left\{ \left[\frac{2p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[1 + \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] - \left[-\frac{2p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] \right\}}{2 \left\{ \left[\frac{2p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \right.}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \pm \sqrt{\left[\left[\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[1 + \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] - \right.} \\
& \quad \left. - \left[\frac{p (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \right] \\
& \quad \left[-\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right]^2 - 4 \left[\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \times \\
& \quad \times \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \left[\frac{p (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \times \\
& \quad \times \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \left\{ \left[\frac{p (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \left[1 + \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] - \right. \\
& \quad \left. - \left[-\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right\}. \tag{20}
\end{aligned}$$

С алгебраической точки зрения причина вещественности и неравенства корней лежит в том, что выбор коэффициентов первой и второй квадратичных форм E, F, G, L, M, N не вполне произволен, т. к. корень квадратный из дискриминанта первой квадратичной формы (функции криволинейных координат u, v) всегда должен быть положителен $\sqrt{EG - F^2} > 0$.

Главные радиусы кривизны R_1 и R_2 можно найти путем определения максимума и минимума кривизны (6) нормального сечения поверхности, или из векторного равенства (19) аналогично (20). Независимой переменной служит касательная, указывающая выбранное направление в касательной плоскости в точке M поверхности витка червяка общего вида, т. е. $dy : dx$

$$\begin{aligned}
R_{1,2} = & \left\langle - \left\{ 2 \left[\frac{p (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \right. \right. \\
& - \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \left[-\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \times \\
& \times \left[1 + \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] \left. \right\} \pm \sqrt{\left\{ 2 \left[\frac{p (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \times \right.} \\
& \times \left. \left(\frac{p x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \left[1 + \left(-\frac{p y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \left[-\frac{2 p x y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] - \right.}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[1 + \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right]^2 - 4 \left\{ \left[1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \times \right. \\
& \times \left. \left[1 + \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] - \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right\} \times \\
& \times \left\{ \left[\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[-\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{p(y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right]^2 \right\} \times \\
& \times \left\{ 2 \left[\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[-\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{p(y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right]^2 \right\}^{-1} \times \\
& \times \sqrt{1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2}. \tag{21}
\end{aligned}$$

Средняя кривизна поверхности витка червяка общего вида H равна полусумме главных кривизн в данной точке поверхности

$$\begin{aligned}
H = & \frac{\left[1 + \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right] \left[\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] - 2 \left\{ \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. 2 \left[1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right]^{\frac{3}{2}} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \left[\frac{p(y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right] \right\} + \left[1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right] \left[-\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right]}{2 \left[1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right]^{\frac{3}{2}}}. \tag{22}
\end{aligned}$$

Гауссова кривизна поверхности витка червяка общего вида K определяется произведением главных кривизн в данной точке поверхности. Гауссову кривизну бывает удобнее определять в виде отношения дискриминантов второй и первой квадратичных форм поверхности

$$\begin{aligned}
K = & \frac{\left[\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right] \left[-\frac{2pxy}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{p(y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right]^2}{2 \left[1 + \left(-\frac{py}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{px}{x^2+y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right]^2}. \tag{23}
\end{aligned}$$

Определим радиусы кривизны для плоских сечений, параллельных координатным плоскостям, в некоторой точке M поверхности витка червяка общего вида:

– секущая плоскость $x = const$

$$R_x = \frac{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{px}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)^2\right]^3}}{-\frac{2pxy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2}}, \quad (24)$$

– секущая плоскость $y = const$

$$R_y = \frac{\sqrt{\left[1 + \left(-\frac{py}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2\right]^3}}{\left[\frac{2pxy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}\right]}, \quad (25)$$

– секущая плоскость $z = const$

$$R_z = \frac{\sqrt{\left[\left(-\frac{py}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{px}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)^2\right]^3}}{\left(\frac{px}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)^2 \left[\frac{2pxy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}\right] - 2\left(-\frac{py}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\right) \left(\frac{px}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) \times \left[\frac{p(y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y}\right] + \left(-\frac{py}{x^2 + y^2} + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2 \left[-\frac{2pxy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2}\right]}. \quad (26)$$

Выводы

1. Через квадратичные формы Гаусса определена кривизна произвольного нормального сечения поверхности витка червяка общего вида.
2. По формуле Родрига получены главные направления поверхности витка червяка.
3. С помощью полученных значений главных направлений, определены главные радиусы кривизны поверхности витка червяка.
4. Установлены средняя и гауссова кривизны поверхности витка червяка.
5. Определены радиусы кривизны для плоских сечений поверхности витка червяка, параллельных координатным плоскостям, секущие плоскости: $x = const$, $y = const$, $z = const$.
6. Полученные результаты планируется использовать при разработке высоконагруженных червячных передач применительно к тяжелому машиностроению.

Литература

1. Кудрявцев В. Н. Червячные передачи. – ЛКВВИА, 1954.
2. Грубин А. Н., Лихциер М. Б. Повышение пределов грузоподъемности и скорости червячных пар с червячными колесами из заменителей оловянистой бронзы // Передачи в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951. – С. 309 – 321.
3. Литвин Ф. Л. Способ шлифования и геометрии поверхности витков цилиндрических червяков с вогнутым профилем // Механика и машиностроение. – Известия Академии Наук СССР ОТН. – М. – 1961. - № 4. – С. 154 – 161.
4. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: изд – во «Наука», 1968. – 584 с.
5. Кривенко И. С. Новые типы червячных передач на судах. – Л.: изд – во Судостроение, 1967. – 256 с.

6. Попов В. А. Цилиндрические червячные передачи с повышенными эксплуатационными свойствами. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 3. – С. 105 – 110.
7. Грубин А. Н. Червячное зацепление. – М.: Оргметалл. – 1936. – 190 с.
8. Люкшин В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1968. – 371 с.
9. Волков Ю. А., Лифшиц Г. А. Некоторые геометрические задачи теории зубчатых передач // Вестник ЛГУ. – 1971. – № 7. – С. 67 – 76.
10. Волков Ю. А., Лифшиц Г. А. Некоторые геометрические задачи теории зубчатых передач // Вестник ЛГУ. – 1971. – № 13. – С. 101 – 105.
11. Фиников С. П. Теория поверхностей. – М. – Л.: ГТТИ, 1934. – 204 с.
12. Выгодский М. Я. Дифференциальная геометрия. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1949. – 511 с.
13. Бюшгенс С. С. Дифференциальная геометрия. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1940. – 300 с.
14. Рашевский П. К. Курс дифференциальной геометрии. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1950. – 428 с.

References

1. Kudrjavcev V. N. Chervjachnye peredachi. – LKVVIA, 1954.
2. Grubin A. N., Lihcier M. B. Povyszenie predelovрузopod#emnosti i skorosti chervjachnyh par s chervjachnymi kolesami iz zamenitelej olovjanistoj bronzy // Peredachi v mashinostroenii. – М.: Mashgiz, 1951. – S. 309 – 321.
3. Litvin F. L. Sposob shlifovaniya i geometrii poverhnosti vitkov cilindricheskih chervjakov s vognutym profilem // Mehanika i mashinostroenie. – Izvestija Akademii Nauk SSSR OTN. – М. – 1961. – № 4. – S. 154 – 161.
4. Litvin F. L. Teorija zubchatyh zaceplenij. – М.: izd – vo «Nauka», 1968. – 584 s.
5. Krivenko I. S. Novye tipy chervjachnyh peredach na sudah. – L.: izd – vo Sudostroenie, 1967. – 256 s.
6. Popov V. A. Cilindricheskie chervjachnye peredachi s povyshennymi jekspluatacionnymi svojstvami. // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2010. – № 3. – S. 105 – 110.
7. Grubin A. N. Chervjachnoe zaceplenie. – М.: Orgmetall. – 1936. – 190 s.
8. Ljukshin V. S. Teorija vintovyh poverhnostej v proektirovanii rezhuvih instrumentov. – М.: Mashinostroenie, 1968. – 371 s.
9. Volkov Ju. A., Lifshic G. A. Nekotorye geometricheskie zadachi teorii zubchatyh peredach // Vestnik LGU. – 1971. – № 7. – S. 67 – 76.
10. Volkov Ju. A., Lifshic G. A. Nekotorye geometricheskie zadachi teorii zubchatyh peredach // Vestnik LGU. – 1971. – № 13. – S. 101 – 105.
11. Finikov S. P. Teorija poverhnostej. – М. – Л.: GTTI, 1934. – 204 s.
12. Vygodskij M. Ja. Differencial'naja geometrija. – М. – Л.: GITTL, 1949. – 511 s.
13. Bjushgens S. S. Differencial'naja geometrija. – М. – Л.: GITTL, 1940. – 300 s.
14. Rashevskij P. K. Kurs differencial'noj geometrii. – М. – Л.: GITTL, 1950. – 428 s.

Ю.В. Стрельников

Визначення кривизни поверхні витка черв'яка загального вигляду

Отримані вирази, що визначають основні критерії кривизни поверхні витка черв'яка загального вигляду, а також радіуси кривизни плоских перерізів.

Ключевые слова: червяк, кривизна, образующая, поверхность.

Yu.V. Strelnikov

Determination of curvature of surface of coil of worm of general view

Expressions, qualificatory the basic criteria of curvature of surface of coil of worm of general view, and also radiuses of curvature of flat sections, are got.

Ключові слова: черв'як, кривизна, утворююча поверхня.

Ю.В. Стрельников – аспирант

Рецензент: *Шишов В.П.*, д.т.н., проф. кафедры "Машиноведение" Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСА ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С КРУГОВЫМИ ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ЗУБЬЯМИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Изложена технология оценки изменения размеров пространственных тел на примере измерения износа зубьев конических зубчатых передач с круговыми двояковыпукло-вогнутыми зубьями методом лазерного сканирования. Установлена пространственная картина износа зубьев таких передач после определенного периода эксплуатации. Погрешность метода не превышает 0,04 мм. Рис. 6, Табл. 1, Ист.10.

Ключевые слова: двояковыпукло-вогнутые зубья, коническая передача, лазерное сканирование, износ.

В большинстве тяжело нагруженных машин в качестве приводов используются зубчатые передачи и, в частности, конические зубчатые передачи с круговыми двояковыпукло-вогнутыми зубьями (ДВВ-зубьями) [1]. Конические колеса с такими зубьями выгодно отличаются от конических прямозубых колес высокой нагрузочной способностью, большей плавностью зацепления и значительным снижением шума. Недостатком этих колес является сложность настройки зуборезного полуавтомата и контроля геометрических параметров колес после изготовления.

Оценка долговечности передач с круговыми ДВВ-зубьями по исходным параметрам профилей зубьев является приблизительной, поскольку не учитывается тот факт, что из-за износа зубьев форма профиля становится отличной от исходной. В результате меняются параметры контакта, что, в свою очередь, изменяет форму профилей зубьев.

Опыт эксплуатации показал, что конические обкатные колеса с круговыми ДВВ-зубьями внешнего зацепления имеют высокую работоспособность. Однако если расчету зубьев цилиндрических эвольвентных передач на износ уделяется большое внимание [2], то расчет на износ конических передач с ДВВ-зубьями вообще не производится.

Проблемой износа зубьев зубчатых передач занимались многие исследователи. Молдавским Л.А. установлена тесная взаимосвязь между различными видами повреждений зубьев [3]. При анализе этого статистического материала сделано предположение, что развитие повреждений зубьев происходит последовательно. Так, искажение профиля зуба в результате износа приводит к уменьшению радиусов кривизны и, как следствие, к ускоренному развитию выкрашивания и появлению заедания рабочих поверхностей. Эта гипотеза была подтверждена экспериментально. Дж.Р. Мыга экспериментально показал, что искажение профилей закаленных зубьев в результате износа существенно влияет на динамические нагрузки в зацеплении [4]. А. Вилк, Дж. Ш. Куанг и А.Д. Лин ввели в динамическую модель колеса с изношенными зубьями, используя упрощенную модель их профилей и считая передаточное отношение постоянным [5]. Ю.Войнаровски и Онищенко В.П. провели аналитические и экспериментальные исследования влияния деформации и износа зубьев на динамику зубчатых колес [6]. Результаты экспериментов показали, что изменение профиля зубьев во время износа следует учитывать при расчетах на долговечность зубчатых передач [2].

Для решения этой задачи применительно к коническим передачам с круговыми ДВВ-зубьями необходимо разработать метод определения координат профилей изношенных зубьев конических передач с круговыми ДВВ-зубьями, на основании чего можно разработать пространственную модель изнашивания зубьев таких передач на основе плоской модели, разработанной Онищенко В.П. [2].

Информация для установления действительной формы профиля зуба. может быть получена на основе результатов измерения износа зубьев после испытания зубчатых

передач в лабораторных условиях либо после эксплуатации машины. Лабораторные испытания зубчатых колес дают более достоверные результаты, но требуют создания очень дорогостоящих испытательных стендов. Более эффективным способом установления характера износа зубьев является синтез изношенного профиля по результатам измерения износа в производственных условиях.

Анализ известных методов измерения износа [2,7,8] показал, что информацию о форме профиля изношенного зуба в эксплуатационных условиях наиболее целесообразно получать с помощью метода отпечатков. При этом для реализации последующей модели зацепления зубчатых колес с изношенными зубьями результаты измерения износа зубьев должны быть привязаны к теоретическому профилю зуба зубчатого колеса.

В данной работе исследование износа зубьев проводилось на базе анализа зацепления зубчатой передачи режущей части угольного комбайна РКУ10 производства ЗАО «Горловский машиностроитель» (г. Горловка, Донецкая обл., Украина). Параметры исследуемой передачи представлены в таблице 1.

Работа по сбору информации об износе зубьев в эксплуатационных условиях проводилась следующим образом:

- редукторы приводов угольных комбайнов после отработки определенного нормами эксплуатации срока, либо в случае выхода машины из строя, поступали для капитального ремонта в сборочный цех ЗАО «Горловский машиностроитель»;
- после проведения разборки редуктора производилось изготовление слепков впадины зуба;
- по заводскому номеру машины и ее паспорту устанавливалось место эксплуатации и определялась наработка - количество добытого угля.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры исследуемой зубчатой передачи

Параметр	шестерня	колесо
Средний нормальный модуль	13 мм	
Внешний окружной модуль	15,46 мм	
Числа зубьев	13	24
Передаточное число	1,85	
Коэффициенты смещения исходного контура	0,55	0,95
Межосевой угол	90°	
Средняя арифметическая шероховатость	6,3 мкм	
Ширина зубчатого венца	70 мм	
Угловая скорость ведущего вала	27,7 рад/сек	
Вращающий момент на ведущем валу	10420 Н·м	
Удельная нагрузка по длине зуба	1867 Н/мм	
Материал и термическая обработка	сталь 20Х2Н4А цементация, закалка 57÷63HRC ₃	
Предел текучести материала зубчатых колес	1080 МПа	

Для получения слепков на подготовленную поверхность впадины зуба заливался мелкодисперсный гипсовый раствор. После затвердевания раствора производился съем слепка. В обязательном порядке слепок маркировался специальным шифром с целью его последующей идентификации. Для надежности измерений изготавливались слепки двух-трех впадин между зубьями. В отличие от цилиндрических колес, конические колеса с круговыми ДВВ-зубьями имеют сложную пространственную форму, поэтому возникает множество сложностей при выполнении дальнейшей обработки общеизвестными методами [2,8].

В настоящее время есть ряд методов измерения размеров поверхностей трехмерных объектов, но они часто требуют сложного и дорогостоящего оборудования. Однако

есть и более простые системы для сбора трехмерных данных. Так, в данной работе был применен метод лазерного сканирования, предложенный учеными института робототехники и управления технологическими процессами, технического университета Брауншвейга Симоном Вилькенбахом, Свенном Молкенстраком, Фридрихом М. Войле [9], который заключается в анализе трехмерного объекта и сборе данных о его форме. Лазер излучает остронаправленный луч по направлению к объекту. Только малая часть из составляющих этот луч фотонов отражается объектом и регистрируется оптическими датчиками приемного устройства. Какая именно часть – зависит от отражающей способности объекта, которая в свою очередь определяется цветом и фактурой. Необходимым условием данного метода является пересечение лучом лазера двух объектов одновременно – исследуемого объекта, геометрические параметры которого неизвестны, и опорного объекта с известной геометрией, находящегося на заднем плане. В данном случае таким объектом являются две маркированные плоскости, жестко связанные между собой под углом 90° . Маркеры необходимы для калибровки камеры, т.е. для нахождения координат опорного объекта относительно координатной системы камеры. В данной работе калибровка камеры производится по методу Цая [10]. Положение лазера на опорном объекте используется для калибровки лазера – вычисления точной пространственной позиции лазерной плоскости P_L (рис.1).

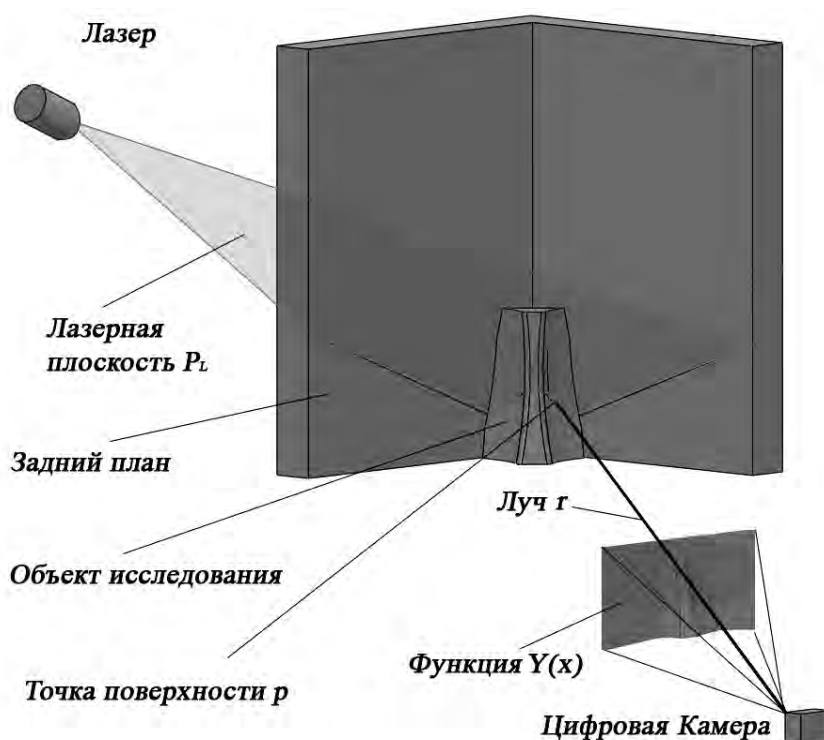


Рис. 1. Триангуляция лазера

Главная цель лазерного сканирования – определение пространственных координат точек, расположенных на поверхности объекта. Так как геометрия опорного объекта известна, определение координат точек видимой лазерной линии происходит на основе анализа положения лучей лазера, отражаемых от опорной плоскости и поглощаемых светочувствительной матрицей камеры. При условии, что точки пересечения в пространстве линейно независимы, они ограничивают положения лазерной плоскости P_L . При каждом измерении луч лазера отклоняется от своего предыдущего положения так, чтобы пройти через узел некоей мнимой нормальной сетки, называемой сканирующей матрицей. Определение лазерной линии производится с точностью до фрагментов пик-

селя, вычисления среднего значения $Y(x)$ координат пикселя в каждом столбце X сканирующей матрицы. После получения функции $Y(x)$ лазерной линии вычисляется пространственное положение лазерной плоскости. Для повторного выбора трех случайных пикселей $Y(x_1)$, $Y(x_2)$, $Y(x_3)$, принадлежащих опорному объекту, используется метод RANSAC [10]. Далее получают уравнения трех световых лучей r_j для каждого из этих пикселей. Результатом пересечения этих световых лучей и известной геометрии опорного объекта являются три точки поверхности p_1 , p_2 , p_3 . Координаты этих точек являются линейно зависимыми и определяют возможное положение лазерной плоскости P_L . Зная уравнение лазерной плоскости P_L и количество пикселей изображения из функции $Y(x)$, которые находятся в одной плоскости и одновременно на сканируемом объекте (рис.1), можно получить уравнение светового луча r для каждого из этих пикселей.

Новые точки поверхности объекта могут быть легко вычислены используя пересечение $p = r \cap P_L$. В процессе сканирования плоскость действия лазера обычно перемещается по объекту несколько раз. Таким образом, лазерная линия может коснуться пропущенных участков слепка и повысить точность измерения, там, где это необходимо. Тем не менее, часто случается, что измеряется несколько точек поверхности для одного и того же пикселя изображения. Это должно быть устранено, используя усредненную (быструю и легкую) или медианную фильтрацию, потребляющую память и замедляющую обработку, но исключающую возможные промахи (резко отличающиеся значения экспериментальных величин).

Измерения производятся с очень высокой скоростью – тысячи, а порой и сотни тысяч измерений в секунду. Результатом работы лазерного сканера является облако точек отражения лазерного луча, которое как бы покрывает поверхность объекта. Для каждой такой точки регистрируются три координаты x , y , z и интенсивность принятого сигнала. Обычно в таком облаке точек насчитывается от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов точек. Затем по этим точкам восстанавливается форма сканируемого объекта – этот процесс называется реконструкцией.

Точность метода зависит от используемого оборудования и его настройки - расстояния до камеры, размера исследуемого объекта, условий света, угла триангуляции, качества калибровочного угла, яркости лазера и т.д. В случае измерения износа данной пары зубчатых передач погрешность метода составляет 0.02 мм.

Далее для вычисления износа трехмерная модель слепка накладывалась на теоретический профиль впадины между зубьями. Сравнение изношенного и теоретического профилей зубьев позволяет оценить износ по высоте и длине зуба.

Для математического описания профильной поверхности зуба была принята ортогональная система координат. Осью абсцисс является ось симметрии зуба, ось ординат проходит через начальную точку эвольвенты профиля, ось аппликат проходит вдоль образующей основного конуса, как показано на рис.2.

Математическая модель боковой поверхности зуба шестерни описывается формулами (1), (2)

$$\text{Левый профиль} \begin{cases} x_{iu} = \frac{R_{bui}}{\cos \alpha} \cos(\gamma - tg \alpha + \alpha) \\ y_{iu} = -\frac{R_{bui}}{\cos \alpha} \sin(\gamma - tg \alpha + \alpha) - R + \sqrt{R^2 - B_i^2} ; \\ z_{iu} = B_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Правый профиль} \begin{cases} x_{ш} = \frac{R_{бу}}{\cos \alpha} \cos(\gamma - tg \alpha + \alpha) \\ y_{ш} = \frac{R_{бу}}{\cos \alpha} \sin(\gamma - tg \alpha + \alpha) + R - \sqrt{R^2 - B_i^2}, \\ z_{ш} = B_i \end{cases} \quad (2)$$

где $x_{ш}, y_{ш}, z_{ш}$ – координаты точек профиля зуба шестерни,
 $R_{бу}$ – радиус основной окружности шестерни,
 α – эвольвентный угол,
 γ – угловая координата начальной точки эвольвенты,
 B_i – расстояние от искомой точки до торца зуба,
 R – радиус резцовой головки.

Матрица, описывающая боковую поверхность зуба шестерни, выражена формулой (3)

$$\mathbf{M}_{ш} = \begin{vmatrix} x_{ш1}, y_{ш1}, z_{ш1} \\ x_{ш2}, y_{ш2}, z_{ш2} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{шn}, y_{шn}, z_{шn} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Соответственно, математическая модель боковой поверхности зуба колеса описывается формулами (4), (5)

$$\text{Левый профиль} \begin{cases} x_{к} = \frac{R_{бк}}{\cos \alpha} \cos(\gamma - tg \alpha + \alpha) \\ y_{к} = -\frac{R_{бк}}{\cos \alpha} \sin(\gamma - tg \alpha + \alpha) + R - \sqrt{R^2 - B_i^2} \\ z_{к} = B_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Правый профиль} \begin{cases} x_{к} = \frac{R_{бк}}{\cos \alpha} \cos(\gamma - tg \alpha + \alpha) \\ y_{к} = \frac{R_{бк}}{\cos \alpha} \sin(\gamma - tg \alpha + \alpha) - R + \sqrt{R^2 - B_i^2} \\ z_{к} = B_i \end{cases} \quad (5)$$

где $x_{к}, y_{к}, z_{к}$ – координаты точек профиля зуба колеса,
 $R_{бк}$ – радиус основной окружности колеса,
 α – эвольвентный угол,
 γ – угловая координата начальной точки эвольвенты,
 B_i – расстояние от искомой точки до торца зуба,
 R – радиус резцовой головки.

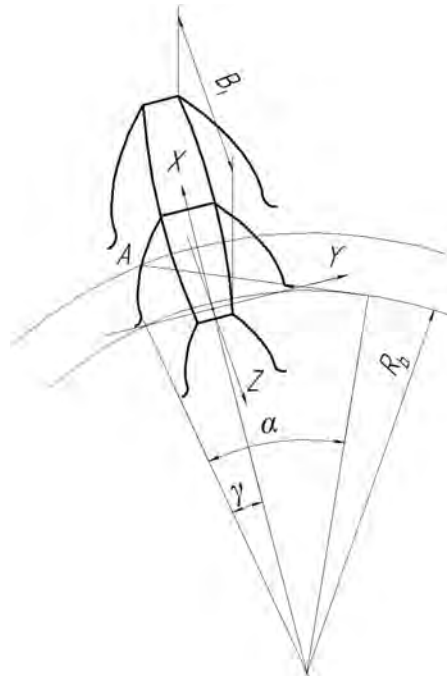


Рис. 2. Система координат для математического описания профильной поверхности зубьев

Матрица, описывающая боковую поверхность зуба колеса, выражена формулой (6)

$$\mathbf{M}_k = \begin{pmatrix} x_{k1}, y_{k1}, z_{k1} \\ x_{k2}, y_{k2}, z_{k2} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{kn}, y_{kn}, z_{kn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Число точек измерения определяется из условия, чтобы расстояние между ними не превышало половину ширины герцовой полоски контакта под рабочей нагрузкой.

По полученным значениям создаются пространственные модели шестерни и колеса. Для обработки полученных изображений используются системы автоматизированного трехмерного проектирования. Трехмерное изображение изношенного отпечатка устанавливается во впадину между зубьями теоретической модели колеса. В связи с тем, что зачастую отсутствует возможность получения нулевого (до начала эксплуатации) отпечатка, базирование изображения изношенного профиля осуществляется на основе выполнения двух условий: симметричность и подобие переходных кривых и неизношенных участков ножки зуба относительно плоскости симметрии впадины (C_1 – для шестерни, C_2 – для колеса) и эквидистантность дуг окружностей впадин изношенного и теоретического профилей. На рис.3 приведен пример базирования слепка во впадине зуба.

После базирования модели производится измерение износа I_i в сечениях по длине зуба. На рис.4 представлено измерение износа в среднем сечении зуба конической двояковыпуклой шестерни.

Затем, руководствуясь формулами (1), (2), (4), (5), производится вычисление координат профиля изношенного зуба в ортогональной системе координат

$$y_i = \frac{R_{bi}}{\cos \alpha_i} \sin(\gamma_i - \text{tg} \alpha_i + \alpha_i) + R - \sqrt{R^2 - B_i^2} - I_i. \quad (7)$$

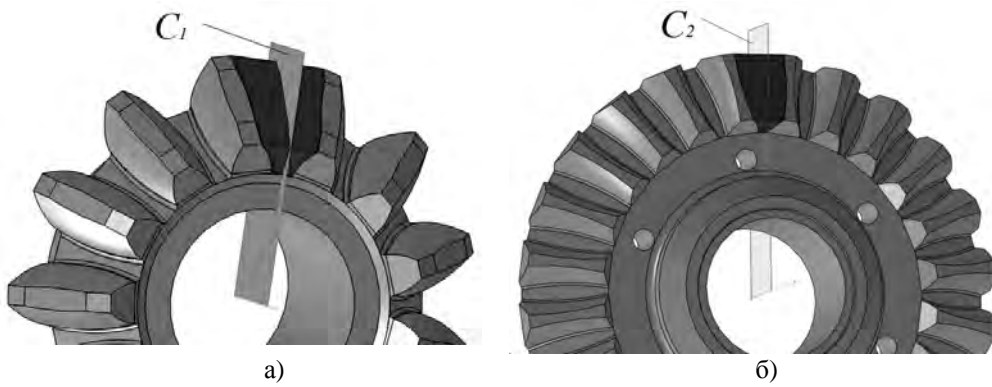


Рис. 3. Базирование слепка во впадине зуба: а) – шестерня; б) – колесо

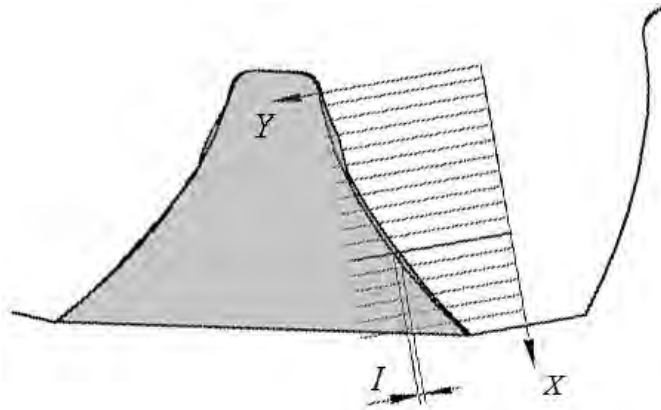


Рис. 4. Определение износа зуба

Координаты x_i и z_i вычисляются по формулам (1), (2), (4), (5) для каждого конкретного случая.

Трехмерные графики распределения износа по длине и высоте зуба двояковыпуклой шестерни и двояковогнутого колеса представлены на рис. 5.

Графики распределения износа в среднем сечении зубьев шестерни и колеса представлены на рис.6.

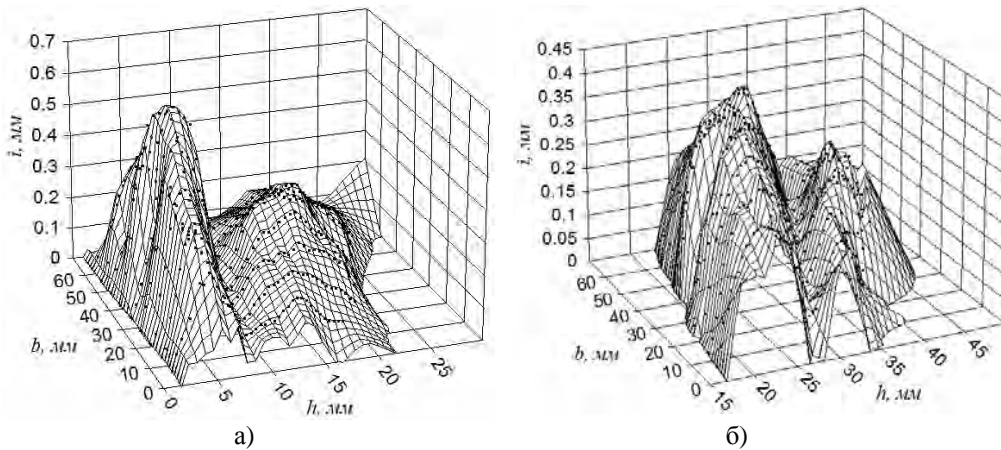


Рис. 5. Распределение износа i по длине зуба b и высоте зуба h : а) – шестерня; б) – колесо

Для среднего сечения зубьев конических колес с круговыми ДВВ-зубьями максимальный износ на зубе шестерни составляет 0,64 мм, на зубе колеса – 0,44 мм. На крайней границе контакта ножки зуба износ отсутствует, затем кривая износа начинает расти. Достигая своего максимального значения, износ зуба начинает уменьшаться и его минимальное значение по высоте зуба приходится на полюс зацепления. Этот минимум составляет около 0,1 мм. Далее наблюдается рост кривой износа. Вторым экстремум кривой находится в зоне середины головки зуба, после которого происходит спад значений износа. По длине зуба износ имеет свое максимальное значение в среднем сечении зуба. Значение износа уменьшается от среднего сечения к торцам зуба.

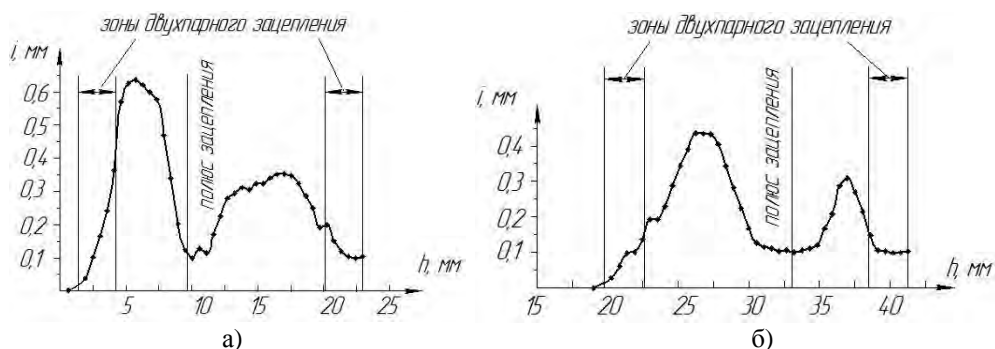


Рис. 6. Распределение износа i по высоте зуба h в среднем сечении:
а) – шестерня; б) – колесо

Допуск на погрешность профиля зуба δ_1 составляет 0,032 мм. Погрешность метода лазерного сканирования δ_2 составляет 0,02 мм. Эти погрешности находятся в одной плоскости и могут проявляться либо в одном, либо в противоположных направлениях. Максимальная погрешность δ данного метода измерения будет иметь место при действии этих погрешностей в одном направлении и составляет 0,038 мм.

Применение разработанной методики является эффективным инструментом для исследования зацепления изношенных зубьев, результаты которого позволят разработать методику прогнозирования долговечности конических зубчатых передач с круговыми ДВВ-зубьями.

В результате исследований, проведенных на основании предложенной технологии измерения износа зубьев конических передач с круговыми ДВВ-зубьями, можно сделать следующие выводы:

- износ зуба неравномерен по его высоте;
- значения износа более чем на порядок превышают допуски на погрешность профиля зуба;
- в зоне теоретического полюса зацепления, несмотря на равенство нулю скорости скольжения, тем не менее, имеет место износ зуба;
- отношение объема изношенного материала зуба шестерни к объемному износу зуба колеса не равно передаточному числу зубчатой передачи.

Л и т е р а т у р а

1. СТП 12.44.28.028 – 76 «Передачи зубчатые конические с круговыми двояковыпукловогнутыми зубьями».
2. Валентин Онищенко «Прогнозирование долговечности тяжело нагруженных зубчатых передач на основе моделирования износа зубьев», МЕХАНИКА, z.131, Gliwice, 1999.
3. Молдавский Л.А., Финкельштейн З.Л., Верклов Б.А. Виды повреждений и долговечность трансмиссий горных машин. М., изд-во «Недра», 1981, 190с.
4. Myga J.R. Wpływ zużycia zęba na wielkość sił dynamicznych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1976.
5. Wilk A. Wpływ parametrów technologicznych i konstrukcyjnych na dynamikę przekładni o zębach prostych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, «Mechanika» Nr.679, Gliwice, 1981, 108 s.

6. Войнаровські Юзеф, Оніщенко В.П. Вплив зношування зубців на динамічні характеристики зубчастої передачі// Вибрації в техніці і технологіях, Всеукраїнський науково технічний журнал. – 2000. - №1, Вінниця: Вінницький державний аграрний університет. С. 34-42.
7. Хрущев М.М. Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов зубчатых колес. М.: «Машиностроение», 1966. – 152 с.
8. Оніщенко В.П., Голдобин В.А. Применение компьютерных технологий для определения износа зубьев зубчатых колес // Вісник Національного Технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць, тематичний випуск “Проблеми механічного привода”, Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004, №30. – С.176-184.
9. Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, and Friedrich M. Wahl. Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. K. Franke et al. (Eds.): DAGM 2006, LNCS 4174, pp. 718–728.
10. Tsai, R.Y.: An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In: IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. (1986) С. 364–374.

References

1. STP 12.44.28.028 – 76 «Peredachi zubchatye konicheskie s krugovymi dvojakovypuklo-vognutymi zub'jami».
2. Valentin Oniwenko «Prognozirovanie dolgovechnosti tjazhelonagruzhennyh zubchatyh poredach na osnove modelirovanija iznosa zub'ev», MECHANIKA, z.131, Gliwice, 1999.
3. Moldavskij L.A., Finkel'shtejn Z.L., Verklov B.A. Vidy povrezhdenij i dolgovechnost' transmissij gornyh mashin. M., izd-vo «Nedra», 1981, 190s.
4. Myga J.R. Wplyw zuzycia zęba na wielkość sił dynamicznych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1976.
5. Wilk A. Wplyw parametrów technologicznych i konstrukcyjnych na dynamikę przekładni o zębach prostych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, «Mechanika» Nr.679, Gliwice, 1981, 108 s.
6. Vojnarovs'ki Juzef, Oniwenko V.P. Vplyv znoshuvannja zubciv na dinamiczni harakteristiki zubchastoї peredachi// Vibracii v tehnikе i tehnologijah, Vseukraїns'kij naukovо tehnichnij zhurnal. – 2000. - №1, Vinnicja: Vinnic'kij derzhavnij agrarnij universitet. S. 34-42.
7. Hruwev M.M. Laboratornye metody ispytaniya na iznashivanie materialov zubchatyh kolos. M.: «Mashinostroenie», 1966. – 152 s.
8. Oniwenko V.P., Goldobin V.A. Primenenie komp'juternyh tehnologij dlja opredelenija iznosa zub'ev zubchatyh kolos // Visnik Nacional'nogo Tehnichnogo universitetu “HPI”. Zbirknik naukovih prac', tematichnij vipusk “Problemi mehanichnogo privoda”, Harkiv: NTU “HPI”. – 2004, №30. – S.176-184.
9. Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, and Friedrich M. Wahl. Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. K. Franke et al. (Eds.): DAGM 2006, LNCS 4174, pp. 718–728.
10. Tsai, R.Y.: An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In: IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. (1986) S. 364–374.

The paper given below represents the estimation technology of the space bodies' size changing by the example of measuring the teeth wear of bevel gears with circular biconvex-concave teeth by the method of laser scanning. The space pictures of teeth wear after a certain period of operation are set. The error of method is not more than 0,04 mm. Fig. 6, Tab. 1, Sour. 10.

Key words: biconvex-concave teeth, bevel gear, laser skanning, wear.

Викладено технологію оцінки зміни розмірів просторових тіл на прикладі виміру зносу зубців конічних зубчастих передач із круговими двоопукло-ввігнутими зубцями методом лазерного сканування. Встановлено просторову картину зносу зубців таких передач після певного періоду експлуатації. Похибка методу не перевищує 0,04 мм. Рис. 6, Табл. 1, Дж.10.

Ключові слова: двоопукло-ввігнуті зубці, конічна передача, лазерне сканування, знос.

Кузнецова А.В. – аспірантка кафедри «Основи проектування машин» Донецького національного технічного університету (г. Донецьк).

Рецензент: Шишов В.П., д.т.н., проф. кафедри «Машиноведение» Восточнoукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТУ НЕЧІТКОЮ РЕГРЕСІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ

Розроблена методика ідентифікації залежності «багатовимірний вхід-вихід» нечіткою регресійною моделлю при нечітко заданих вхідних змінних. Розглянута можливість оптимізації нечіткої регресійної моделі шляхом настроювання її параметрів генетичними алгоритмами за навчальною вибіркою експериментальних даних.

Ключові слова: нечітка регресійна модель, ідентифікація, генетичний алгоритм.

Постановка завдання. Моделювання певного процесу або явища зводиться звичай до апроксимації аналітичної залежності, що в достатній мірі описує взаємозв'язок «входи-вихід». Такий класичний підхід передбачає найчастіше застосування кількісних співвідношень у вигляді рівнянь різного типу. З розвитком інтелектуальних технологій процес встановлення взаємозв'язку між вхідними та вихідними величинами набув нової форми: застосування нейронних мереж, нечіткої логіки та нейро-нечітких підходів. Комбінація цих технологій сумісно з генетичними алгоритмами та ймовірнісними обчисленнями утворила нову методологію під назвою «Soft Computing», що дозволило уникнути багатьох труднощів використання всіх цих напрямів окремо. Певні недоліки використання м'яких обчислень [1] при моделюванні процесів різної природи змусли шукати нових підходів ідентифікації нелінійних об'єктів.

Математична модель. Розглянемо задачу моделювання нелінійних залежностей типу

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

з n входами $(x_i, i = \overline{1, n})$ та одним виходом (y) . Передбачається, що вихід y може бути:

а) неперервним, тобто $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$,

б) дискретним, тобто $y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$,

де $[\underline{y}, \overline{y}]$ - діапазон; $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ - класи можливих значень вихідної змінної y .

Дискретизація неперервного виходу, якщо значення вихідної змінної розбити на m підінтервалів, може відбуватись наступним чином:

$$[\underline{y}, \overline{y}] = \underbrace{[\underline{y}, y_1]}_{d_1} \cup \underbrace{[y_1, y_2]}_{d_2} \cup \dots \cup \underbrace{[y_{j-1}, y_j]}_{d_j} \cup \dots \cup \underbrace{[y_{m-1}, \overline{y}]}_{d_m}.$$

Тоді для кожного із класів рішень (інтервалів) можна ввести модель [1]

$$y_j^l = \sum_{i=1}^n a_i^j z_i^{jl} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j z_{i_1}^{j l_1} z_{i_2}^{j l_2} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \sum_{i_3 \neq i_1, i_2}^n a_{i_1 i_2 i_3}^j z_{i_1}^{j l_1} z_{i_2}^{j l_2} z_{i_3}^{j l_3} + \dots, \quad (2)$$

за якою визначається ступінь належності вихідної змінної j -ому класу рішень (підінтервалу) при певному векторі вхідних змінних l -го експерименту. Числа z_i^{jl} встановлюють якою мірою значення x_{i_1} змінної x_i в l -ому експерименті сприятливо для попадання в j -ий клас рішення (підінтервал), $z_i^{jl} \in [0, 1]$. Для кожної змінної x_i значення z_i^{jl} визначаються через функції належності $\mu_j(x_i)$ її нечіткій множині значень, сприятливих по-

паданню вихідної змінної у j -ий клас рішення (підінтервал). Зрозуміло, що вихідна змінна буде визначатись функцією належності того ж типу, що і вхідна. Для зручності виконання операцій над нечіткими числами будемо використовувати функції $(L-R)$ -типу. Нечітке число $(L-R)$ - типу при фіксованих L і R функціях однозначно буде визначатися трійкою параметрів (a, α, β) [2]. Тоді вихідна змінна у випадку взаємодій другого порядку [1], які в багатьох випадках достатньою мірою описують синергетичний ефект між деякими змінними, опишеться функцією

$$\mu_j(y_j) = \begin{cases} L \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1} x_{i_2} - y_j \right)}{\left(\sum_{i=1}^n a_i^j \alpha_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1} \alpha_{i_2 j} + x_{i_2} \alpha_{i_1 j} \right) \right)}, \\ R \frac{\left(y_j - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1} x_{i_2} \right) \right)}{\left(\sum_{i=1}^n a_i^j \beta_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j \left(x_{i_1} \beta_{i_2 j} + x_{i_2} \beta_{i_1 j} \right) \right)}. \end{cases} \quad (3)$$

Будемо використовувати функції належності типу $\mu^T(x) = \left(1 + \left(\frac{x-b}{c} \right)^2 \right)^{-1}$, що

мають тільки два параметра настроювання: b – координату максимуму функції і c – коефіцієнт розтягування. Тоді співвідношення (3) можна записати у вигляді

$$\mu_j(X^*) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i^j b_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j b_{i_1}^j b_{i_2}^j - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1} x_{i_2} \right)}{\sum_{i=1}^n a_i^j c_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j (b_{i_1}^j c_{i_2 j} + b_{i_2}^j c_{i_1 j})} \right)^2} \quad (4)$$

Запропонована методика дозволяє обчислити вихідну змінну у вигляді нечіткої

$$\text{множини } \tilde{y} = \left\{ \frac{\mu^{d_1}(y)}{d_1}, \frac{\mu^{d_2}(y)}{d_2}, \dots, \frac{\mu^{d_m}(y)}{d_m} \right\}.$$

У разі неперервного виходу необхідно провести дефазифікацію за одним із відомих методів.

Для розрахунку значень функцій належності вихідної змінної класам $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ можливих її значень за співвідношенням (4) необхідно мати значення параметрів функцій належності $B_j = (b_1^j, b_2^j, \dots, b_n^j)$ та $C_j = (c_1^j, c_2^j, \dots, c_n^j)$ та параметрів

$A_j = (a_1^j, a_2^j, \dots, a_n^j, a_{12}^j, a_{13}^j, \dots, a_{i_1 i_2}^j, \dots, a_{n-1n}^j)$ нечіткої регресійної моделі (2).

Таким чином, задача настроювання моделі (2) складається у підборі для кожного із класів можливих значень (підінтервалів) вихідної змінної у таких векторів (A, B, C) , що задовольняють обмеженням

$$a_i^j \in [0, 1], b_i^j \in [b_i^j, \overline{b_i^j}], c_i^j \in [c_i^j, \overline{c_i^j}], i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$$

і забезпечують мінімум:

$$\sum_{l=1}^M \left[F(X^l, A, B, C) - y^l \right]^2 = \min_{A, B, C} \quad (5)$$

для об'єкту $y = F(X, A, B, C)$ з неперервним виходом;

та умову

$$\sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^m \left[\mu^{d_j}(X^l, A, B, C) - \mu^{d_j}(X^l) \right]^2 \right] = \min_{A, B, C}, \quad (6)$$

$$\text{де } \mu^{d_j}(X^l) = \begin{cases} 1, & d_j = d^l \\ 0, & d_j \neq d^l \end{cases}, \quad j = \overline{1, m}$$

для об'єкту $(\mu^{d_j}(X, A, B, C), j = \overline{1, m})$ з дискретним виходом.

Таку параметричну ідентифікацію можна здійснити за навчальною вибіркою генетичними алгоритмами, де хромосомою буде виступати вектор, що складається із компонентів векторів A_j та (B_j, C_j) , $j = \overline{1, m}$.

Для об'єктів з неперервним виходом навчальна вибірка визначається у вигляді M пар експериментальних даних «входи-вихід»:

$$(X^l, y^l), \quad X^l = (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l), \quad l = \overline{1, M}.$$

Для об'єктів з дискретним виходом навчальна вибірка визначається як L пар даних:

$$(X^l, d^l), \quad X^l = (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l), \quad d^l \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, \quad l = \overline{1, L}$$

За можливістю, для зменшення розмірності задачі оптимізації, вектори (B_j, C_j) параметрів функцій належностей доцільно знаходити одним із відомих методів побудови функцій належності: при наявності певної групи експертів - методом статичної обробки експертної інформації.

Генетичний алгоритм використовує початкову множину варіантів-рішень (батьків), що кодуються як хромосоми $S = (A, B, C)$ і підлягають операціям схрещування і мутації. Операція схрещування формує нові варіанти-рішення, а мутація забезпечує відновлення генів, що були вилучені з популяції в ході операції відбору, і які тепер можуть бути досліджені в новому контексті, та можливістю утворення генів, які не були представлені в початковій популяції.

Ініціалізація популяції відбувається випадковим чином через операції:

$$\begin{aligned} a_i^{j0} &= \text{RANDOM}([0, 1]), \\ b_i^0 &= \text{RANDOM}(\left[\underline{x}_i, \overline{x}_i \right]), \\ c_i^0 &= \text{RANDOM}(\left[\underline{c}_i, \overline{c}_i \right]), \end{aligned}$$

де $[\underline{c}_i, \overline{c}_i]$ та $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ - відповідні межі; $\text{RANDOM}(\left[\underline{\xi}, \overline{\xi} \right])$ - операція знаходження рівномірно розподіленого на інтервалі $[\underline{\xi}, \overline{\xi}]$ випадкового числа.

Оцінювання хромосоми у популяції виконується за функцією відповідності $FF(S)$ (від англ. fitness function):

$$FF(S) = -\sum_{l=1}^M \left[F(X^l, A, B, C) - y^l \right]^2 \quad (7)$$

для об'єкту з неперервним виходом, та

$$FF(S) = -\sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^m \left[\mu^{d_j}(X^l, A, B, C) - \mu^{d_j}(X^l) \right]^2 \right] \quad (8)$$

для об'єкту з дискретним виходом.

Вибір батьків для схрещування відбувається в залежності від ймовірності, що розраховується за наступною формулою [3]:

$$P_i = \frac{FF'(S_i)}{\sum_{j=1}^K FF'(S_j)}, \quad (9)$$

де $FF'(S_i) = FF(S_i) - \min_{j=1, K} |FF(S_j)|$.

Для покоління t популяція індивідумів позначається через $P(t)$, а набір нащадків, що були отримані із поточної популяції, – через $C(t)$. З введеними позначеннями загальна структура генетичного алгоритму має вигляд [3]:

Процедура: Генетичний алгоритм

початок

$t:=0$;

ініціалізувати $P(t)$;

оцінити $P(t)$;

поки (не_досягнуто умови_завершення)

схрещувати $P(t)$ щоб одержати $C(t)$;

оцінити $C(t)$;

Вибрати $P(t+1)$ із $P(t)$ і $C(t)$;

$t:=t+1$;

кінець

кінець.

По закінченню всіх етапів генетичного алгоритму обирається хромосома $S = (A, B, C)$ з найбільшим значенням функції відповідності. Така хромосома представляє субоптимальний розв'язок оптимізаційної задачі.

Висновки. Запропонований генетичний підхід дозволить знайти невідомі параметри нечіткої регресійної моделі, тобто отримати субоптимальний розв'язок задачі оптимізації, що дасть можливість зменшити до мінімуму розбіжність модельних та експериментальних результатів моделювання.

Література

1. Тащилин М.В. Нечеткая экспертная система с регрессионным механизмом логического вывода / М.В.Тащилин, Т.И. Каткова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №4. – С. 69–75.
2. Раскин Л.Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Раскин Л.Г., Серая О.В. – Х.: Парус, 2008. – 352 с.
3. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. - Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. - 320 с.
4. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Штовба С.Д. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288с.

References

1. Tawilin M.V. Nechetkaja jekspertnaja sistema s regressionnym mehanizmom logicheskogo vyvoda / M.V.Tawilin, T.I. Katkova // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». – Harkiv: NTU "HPI". – 2009. – №4. – S. 69–75.
2. Raskin L.G. Nechetkaja matematika. Osnovy teorii. Prilozhenija / Raskin L.G., Seraja O.V. – H.: Parus, 2008. – 352 s.
3. Rotshtejn A.P. Intellektual'nye tehnologii identifikacii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmy, nejronnye seti / Rotshtejn A.P. - Vinnica: UNIVERSUM-Vinnicja, 1999. - 320 s.
4. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB / Shtovba S.D. — M.: Gorjachaja linija — Telekom, 2007. — 288s.

Розроблена методика ідентифікації залежності «багатовимірний вхід-вихід» нечіткою регресійною моделлю при нечітко заданих вхідних змінних. Розглянута можливість оптимізації нечіткої регресійної моделі шляхом настроювання її параметрів генетичними алгоритмами за навчальною вибіркою експериментальних даних.

Ключові слова: нечітка регресійна модель, ідентифікація, генетичний алгоритм.

The developed method of authentication of dependence «multidimensional entrance-output» of the fuzzy regressive model at the unexpressly set entrance variables. Considered possibility of optimization of fuzzy regressive model by tuning of its parameters by genetic algorithms after the educational retrieval of experimental data.

Keywords: fuzzy regressive model, authentication, genetic algorithm

Ташілін Максим Васильович – к.т.н., доцент кафедри фізико-математичних дисциплін Луганського національного аграрного університету (м. Луганськ);

Ташіліна Анастасія Віталіївна – асистент кафедри фізико-математичних дисциплін Луганського національного аграрного університету (м. Луганськ).

Рецензент: *Грібанов В.М.*, д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної математики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

УДК 656.063.436

О.А. Хлестова, И.О. Берестовой
г. Мариуполь

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЗАТРАТ ПРИРОДНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОСНОВЕ

Исследованы затраты природно-сырьевых ресурсов в транспортно-технологических процессах металлургического производства и произведена их оценка на многокритериальной основе.

Ключевые слова: природные сырьевые ресурсы, структура, транспорт, технология, многокритериальная оценка.

Постановка проблемы. Транспортно-технологическая система подготовки сырья в доменном производстве представляет собой сложную логистическую совокупность значительного количества связанных между собой технологическими процессами специфических объектов, каждый из которых имеет свои показатели и оценивается с использованием различных по значимости критериев.

Объекты и технологии следуют один за другим последовательно, начиная от послетранспортных технологий подготовки сырья с последующим технологическим процессом переработки и подготовки сырья к использованию в доменном производстве и операции загрузки подготовленного сырья в доменную печь (потребление сырья).

Создание надежно работающей системы транспортно-технологического процесса подготовки сырья в доменном производстве, рационально сочетающей включенные в

нее объекты и технологии с различными критериями оценки, требует тщательного их анализа, особенно с позиций надежности каждого из составляющих.

Прежде всего, возникает проблема надежности функционирования системы в целом, ее способности обеспечить требуемую высокую производительность при специфических условиях технологического процесса и соответствующих рациональных затратах [1].

Целью статьи является повышение эффективности транспортно-технологической системы подготовки сырья в доменном производстве, путем разработки и использования методологии многокритериальной оценки параметров и показателей объектов и технологий процесса, позволяющей определять их приоритетность и выбирать направления их совершенствования.

Современное состояние путей решения проблемы. Как отмечалось выше, транспортно-технологический процесс подготовки сырья представляет собой весьма сложную по структуре систему, включающую в себя определенное множество объектов и технологий, взаимосвязанных разносторонними их оценочными критериями и показателями, порой не совместимыми друг с другом, а иногда и противоречащими.

Логистические потоки и составляющие их элементы транспортно-технологического процесса подготовки сырья доменного производства в большинстве своем имеют разнородные оценочные критерии, например: тонна, кВт, балл, час, ПДК, килобайт, м³, штук, км, единица цены и другие [2].

Известно, что когда число критериев больше двух, общепринятого подхода к решению задач оптимизации не существует [3].

Из методов многокритериальной оценки для наших условий наиболее приемлемыми являются человеко-машинные процедуры, в которых применим диалог лица, принимающего решение и ЭВМ, с учетом современных достижений информационных технологий и средств телематики [3-4].

Решаемые задачи. В транспортно-технологическом цикле доменного производства (ТТЦ ДП) несколько разнородных критериев можно сравнить и для них вывести обобщенный показатель с помощью метода, суть которого изложена ниже.

Материалы и результаты исследований. Транспортно технологический процесс подготовки сырья с позиций использования природно-энергетических ресурсов и защиты окружающей среды от вредного воздействия на нее технологий и объектов, может быть оценен по 8 критериям (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Экспертно установленный вес и принятые границы критериев затрат

№ п/п	Критерии	Показатель критерия	Вес критерия, ω_i	Границы критерия	
				Начальная	Конечная
1	Атмосфера	Усл. ед. цены на 1 т сырья	0,039	0,0001	11,3
2	Гидросфера	-"	0,001	0,00002	3,5
3	Литосфера	-"	0,515	0,000004	0,04
4	Фитосфера	-"	0,322	0,0000003	0,006
5	Биосфера	-"	0,052	0,00001	0,01
6	Территории	м ² /т	0,013	0,000002	0,01
7	Трудресурсы	Чел/час/т	0,052	0,002	0,24
8	Энергоресурсы	кВт/час/т	0,006	0,003	0,87
$S = \sum_{i=1}^8 \omega_i$			1,000		

В нашем случае функция предпочтений соответствующих критериев не задана в явном виде.

Информация о ней представлена в виде табличных данных весов критериев (табл. 1).

Вместо веса (ω_i) i -го критерия может использоваться его значимость δ_i , определяемая, например, по начальной (A_{in}) или конечной (A_{ik}) границе критерия, например:

$$\delta_i = \Delta_{in} / \omega_i . \quad (1)$$

Для оценки вредного воздействия на окружающую среду транспортно-технологического процесса подготовки сырья доменного производства, на основе предложенных критериев, выполняются следующие действия:

1. Каждому элементарному критерию экспертным путем устанавливается вес в совокупности с другими критериями (табл. 1).

2. Расчет производится на основе результатов исследований различных систем транспортно-технологических процессов с различными сырьевыми материалами.

Сумма всех весов критериев должна равняться единице.

Используемые критерии имеют различные единицы измерения, потому значения обобщающего показателя не могут быть получены простым их суммированием.

3. Фактические значения критериев переводятся в относительные оценки безразмерной шкалы.

Переход к безразмерной шкале оценок позволяет избавиться от влияния единиц измерения.

"Нулем" безразмерной шкалы принимается наименьшее значение критерия – его нижняя граница.

Его верхняя граница – наибольшее значение критерия взято за "сто".

3. Определяются относительные оценки обобщающего показателя по показателям. Он равен сумме относительных оценок элементарных критериев, взятых с заранее определенным весом.

Целевая функция значений обобщающего критерия затрат представляет собой линейную зависимость по факторам – элементарным критериям.

Каждый критерий входит в целевую функцию с определенным коэффициентом – весом. Все веса критериев положительны и принято, что их сумма составляет единицу.

Пусть $j = 1, \dots, m$ – номера критериев, а $\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_m$ – вес каждого критерия в совокупности.

По условию:

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1 . \quad (2)$$

Исключение влияния единиц измерения производится переводом фактических значений критериев в оценки безразмерной шкалы.

Безразмерная шкала задается для каждого критерия его начальной и конечной границей.

Обозначим через S_j , ($j=1\dots m$) – начальную границу, а через F_j , ($j=1\dots m$) – конечную границу j -го критерия.

Шкала принята размерности сто единиц, где S_j является "нулем" j -го критерия, а F_j – "сто".

Значения критериев для определенного транспортно технологического процесса подготовки сырья образуют матрицу A размерности $n \times m$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m} \\ \dots \\ \dots \\ a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nm} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где a_{ij} – значение j -го критерия.

Обозначим через B матрицу размерности $n \times m$ относительных оценок элементарных критериев

$$B = \begin{pmatrix} b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1m} \\ \dots \\ \dots \\ b_{n1}, b_{n2}, \dots, b_{nm} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где b_{ij} – относительная оценка j -го критерия.

На рис. 1 схематично представлено соответствие фактических значений критерия и его безразмерных оценок. Ниже оси отложена шкала фактических значений критерия, а выше оси – шкала безразмерных оценок.

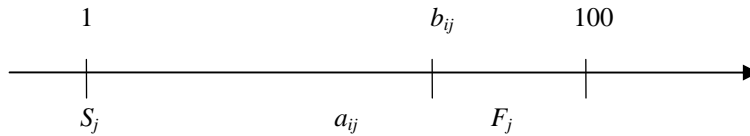


Рис. 1. Соответствие фактического значения критерия и его безразмерной оценки

Из рис. 1. видно взаимоднозначное соответствие между значениями критериев и относительными их оценками.

Относительные оценки находятся по формуле:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - S_j}{F_j - S_j} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Через вектор B' размерности n обозначим обобщающий критерий

$$B' = (b_1', \dots, b_j', \dots, b_n'), \quad (6)$$

где b_j' – относительное значение обобщающего критерия, которое рассчитывается по формуле:

$$b_j' = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot b_{ij}, \quad (i=1..n). \quad (7)$$

В разработанную модель подставляем данные из табл. 1, а средствами ЭВМ получены относительные оценки элементарных и обобщающего критериев по затратным характеристикам природных ресурсов в ТТЦ ДП (фитосфера, литосфера, атмосфера, гидросфера и др.).

Для примера, в табл. 2 по данным [2, 5] приведены итоги расчетов для начального (1-го, ввоз сырья) и конечного (34-го, вывоз чугуна) этапов ТТЦ ДП.

Т а б л и ц а 2

Относительные оценки критериев затрат по этапам подготовки сырья

и эвакуации продукции доменного производства

Ресурсы \ Этапы (1-34)	Атмосфера	Гидросфера	Литосфера	Фитосфера	Биосфера	Территории	Трудресурсы	Энергоресурсы
1	4,42	0,03	2,49	5,00	9,91	19,98	0,01	13,49
...
34	37,17	0,01	7,49	0,05	100,00	100,00	11,76	45,79

По разработанной методике с использованием ЭВМ определены значимости критериев и построена гистограмма относительных оценок критериев и целевой функции затрат по этапам подготовки металлургического сырья и эвакуации последоменной продукции (рис. 2).

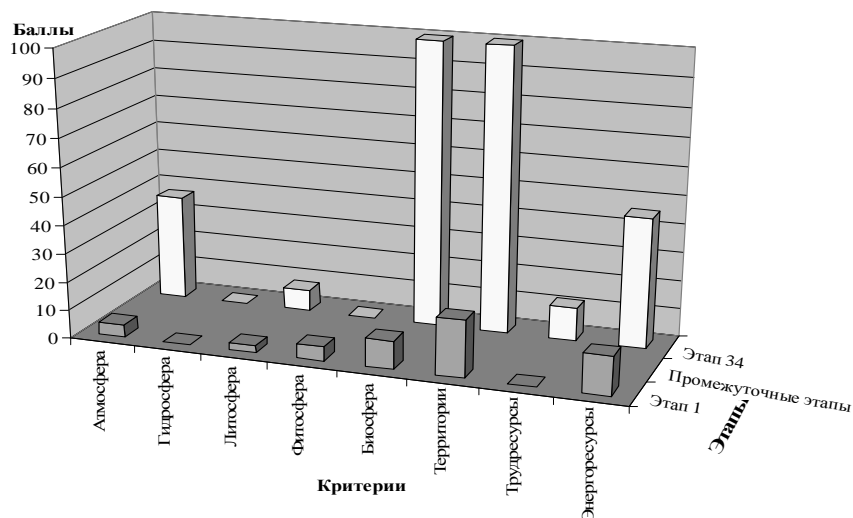


Рис. 2. Гистограмма относительных оценок критериев и целевой функции затрат по этапам подготовки металлургического сырья и эвакуации последоменной продукции

На основе построенного графика с учетом веса критерия можно уже определять максимально оптимальные направления исследования и совершенствования ячейки «Критерий – Этап» в технологическом процессе, с получением максимально положительного технико-экономического результата.

Вывод. Предложенная методика представления структуры основных этапов с присутствующими им логистическими потоками и составляющими их технологий и объектов процесса подготовки сырья, а также основы их ранжирования и технико-экономической экспертной оценки лицом принимающим решение по результатам функционирования транспортно-технологического цикла подготовки сырья и влияния воздействия его на окружающую среду, позволяет практически рассмотреть весь названный процесс на предмет значимости его составляющих и принятия решений по защите окружающей среды.

Литература

1. Хлестова О.А., Берестовой А.М. Синтез транспорта грузов, изменяющих своё агрегатное состояние в процессе перевозки // Вестник ПГТУ (сборник науч. трудов), № 1; Мариуполь. – 1995. – 4 с.
2. Берестовой А.М. Синтез процессов и объектов в материальных потоках транспорта затвердевающих жидкостей // Дисс. докт. техн. наук. – 05.22.12. – Луганск, ВУНУ, 2001. – 366 с.
3. Шахов И.Ф. Вопросы анализа и процедуры принятия решений // М.: Мир, 1976. – 232 с.
4. Geoffrion A.M., Vektor Maximal Dekomposition Programming, Paper presented at the 7th Intern. Symp. on Math. Programming, The Hague, Holland, Sept. 14-18, 1970.
5. Хлестова О.А., Берестовой А.М., Капустин Е.А. Мониторинг эколого-энергетической эконометрии транспортно-технологических циклов промышленных производств // Экология и ресурсосбережение. – 2001. – № 1. – С. 48-52.

References

1. Hlestova O.A., Berestovoj A.M. Sintez transporta gruzov, izmenjajuwih svojo agregat-noe sostojanie v processe perevozki // Vestnik PGTU (sbornik nauch. trudov), № 1; Mariupol'. – 1995. – 4 s.
2. Berestovoj A.M. Sintez processov i ob#ektov v material'nyh potokah transporta zatverdevajuwih zhidkostej // Diss. dokt. tehn. nauk. – 05.22.12. – Lugansk, VUNU, 2001. – 366 s.
3. Shahov I.F. Voprosy analiza i procedury prinjatija reshenij // M.: Mir, 1976. – 232 s.

4. Geoffrion A.M., Vektor Maximal Dekomposition Programming, Paper presented at the 7th Intern. Symp. on Math. Programming, The Hague, Holland, Sept. 14-18, 1970.

5. Hlestova O.A., Berestovoj A.M., Kapustin E.A. Monitoring jekologo-jenergeticheskoj jekonometrii transportno-tehnologicheskikh ciklov promyshlennykh proizvodstv // Jekologija i resursosberezhnie. – 2001. – № 1. – S. 48-52.

Хлестова О.А., Берестовой І.О.

Дослідження та оцінка затрат природно-сировинних ресурсів в транспортно-технологічних процесах металургійного виробництва на багатокритеріальній основі

Досліджені витрати природно-сировинних ресурсів в транспортно-технологічних процесах металургійного виробництва і проведена їх оцінка на багатокритеріальній основі.

Ключові слова: природні сировинні ресурси, структура, транспорт, технологія, багатокритеріальна оцінка.

Khlestova O.A., Berestovoi I.O.

Research and estimation of expenses of a natural source of raw materials in transport technological processes of metallurgical manufacture on the basis of many criteria

Expenses of a natural source of raw materials in transport technological processes of metallurgical manufacture are investigated and their estimation on the basis of many criteria is made.

Key words: natural source of raw materials, structure, transport, technology, estimation on the basis of many criteria.

Хлестова Ольга Анатольевна – старший преподаватель кафедры теплофизики и теплоэнергетики Приазовского государственного технического университета (г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина);

Берестовой Иван Олегович – аспирант кафедры «Эксплуатация судовых энергетических установок» Азовского морского института Одесской национальной морской академии (г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина).

Рецензент: *Берестовой А.М.*, доктор технических наук, профессор Азовского морского института Одесской национальной морской академии (г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина).

УДК 658.382.3

И.Н. Арнаут, В.П. Гуляев

г. Луганск

ПРИРОДНЫЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДОНБАССА КАК ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА УКРАИНЫ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на жизнедеятельность населения в Донбасском регионе, а также рекомендации по ликвидации их негативных влияний на окружающую среду.

Ключевые слова: природная среда, атмосфера, воздушный бассейн, радионуклиды, минерализация

Анализ состояния вопроса. Донбасс – это крупнейший промышленный регион Украины, в котором насчитывается несколько тысяч крупнейших промышленных предприятий, производственно-промышленных объединений и предприятий топливно-энергетического комплекса, горнодобывающей, металлургической, химической промышленности и строительной отрасли. Одним из основных факторов, влияющих на экологическую обстановку региона является развитие добывающей и перерабатывающей промышленности, а также производство стройматериалов при устаревших технологиях и связанная с этим чрезмерная урбанизация многих районов.

Состояние природной среды определяется также следующими специфическими факторами: засушливым климатом и маловодностью; отсутствием комплексной системы природоохранных мероприятий, остаточным принципом финансирования и материально-технического обеспечения; интенсивной урбанизацией территорий, высокой степенью концентрации промышленности. Длительное воздействие этих факторов негативно влияет на состояние природных экосистем и на условия жизни и здоровья населения.

Цель статьи. Своевременный анализ состояния атмосферного воздуха, водных ресурсов, загрязнение почвы, а также анализ экологического последствия массового закрытия шахт, необходимых для создания расчетных моделей изменения окружающей природной среды, подготовки рекомендаций для принятия решений по предотвращению экологической катастрофы, что существенно изменит условия жизнедеятельности в регионе.

Материалы и результаты исследований. Высокая концентрация промышленного и сельскохозяйственного производства, транспортной инфраструктуры, в сочетании с высокой плотностью населения, создали чрезвычайно высокую техногенную и антропогенную нагрузку на биосферу – наивысшую в Украине и Европе. Суммарная техногенная нагрузка на единицу территории Донбасского региона в 4 раза выше среднего по Украине.

Несмотря на спад производства, в результате которого общее количество выбросов и сбросов существенно уменьшилось, нагрузка на биосферу Донбасса по-прежнему остаётся одной из наибольших в Европе. Предприятия региона выбрасывают около трети суммарного объема загрязняющих веществ на Украине. Высокие скорости и масштабы техногенных процессов, перемещения горных масс обуславливают большие объёмы рассеивания химических элементов (прежде всего углерода и тяжелых металлов), вызывают накопления в окружающей среде соединений в несвойственных природе сочетаниях.

В настоящее время наш регион является источником до 40% всех выбросов страны. Выбросы вредных веществ в атмосферу от стационарных источников, по данным Госкомстата Украины, составляют в год, в Луганской области – 227,5 тыс.т, плотность выбросов в расчете на 1 км² – 8524,7 кг, а в Донецкой области соответственно составляют 845,1 тыс.т и 31871 кг.

В структуре вредных выбросов преобладает оксид углерода, на долю которого приходится почти 28,8% всех выбросов, сернистый ангидрид (диоксид серы) – 21,3%, пыль – 15% и лёгкие органические соединения – 13%.

Сверхнормативные выбросы промышленных предприятий и автотранспортных средств наносят значительный вред атмосфере больших промышленных городов, таких как, Мариуполь, Донецк, Алчевск, Северодонецк и др. Это обусловило превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) диоксида азота (от 1,2 до 3,3 ПДК), пыли (до 1,3 ПДК), сернистого ангидрида (до 2 ПДК), оксида углерода (до 1,25 ПДК), аммиака (до 3 ПДК), фенола (до 3,2 ПДК).

Особую опасность загрязнения воздуха создают горящие отвалы. По данным исследований Макеевского НИИ, в среднем за сутки с одного отвала в окружающую среду выбрасывается 150 тонн диоксида углерода, 10 тонн окисла углерода, 1,5 тонны диоксида серы, 0,4 тонны сероводорода, 0,1 тонны окислов азота.

На угольных шахтах Луганской области образовалось более 100 тыс. м³ отходов с техногенно-усиленной естественной радиоактивностью, которые по радиационным характеристикам мало в чем уступают отходам уранодобывающих и ураноперерабатывающих предприятий. Происходят выбросы и сбросы в окружающую среду естественных радионуклидов. Установлено также, что с 1 га поверхности терриконов ежегодно ветром сдувается до 10 тонн пыли, водными потоками вымывается более 35 тонн мелкозема, значительное количество водорастворимых солей, радионуклидов, тяжелых металлов, фтора. При подтоплении и затоплении территорий резко увеличивается интенсивность растворения техногенных загрязнителей в почвах и подстилающих грунтах, что, в свою очередь, повышает риск загрязнения поверхностных и подземных водозаборов и гидросферы в целом.

Сложная экологическая ситуация негативно влияет на состояние здоровья населения в результате чего снизилась рождаемость и увеличилась общая смертность населения. Особенно высокая смертность в работоспособном возрасте, которая составляет 24% от всех умерших (по Украине – 11%). Коэффициент восстановления населения Донбасса самый крупный в стране – 0,413 тогда как в Украине в целом он составляет 0,519.

Одной из причин неудовлетворительного состояния воздушного бассейна региона – недостаточное оснащение источников выделения загрязняющих веществ высокоэффективным газопылеулавливающим оборудованием и низкий уровень их эксплуатации. Так, в Донбассе оснащены очистными установками лишь около 40% источников выброса вредных веществ. Как и в предшествующие года, причины неудовлетворительного положения и недостаточной оснащённости источников выбросов газоочистным оборудованием остаются прежними – это отсутствие или недостаток обслуживающего и ремонтного персонала, запасных частей и материалов, проблемы финансирования запланированных ремонтных и строительных работ.

Водные ресурсы региона формируются за счёт транзитного притока поверхностных вод, в основном по реке Северский Донец за счёт Харьковской области, местного речного стока, сточных, шахтных и карьерных вод, а также эксплуатационных запасов подземных вод (1067 тыс. куб. м в сутки).

Основными загрязнителями водных объектов являются предприятия горной и металлургической промышленности. Техногенному воздействию подвергаются огромные территории от Дона до Днепра, на которых расположено более сотни угольных шахт. Ежегодно они сбрасывают около 500 млн. м³ шахтных вод, загрязнённых минеральными солями, взвешенными веществами и бактериальными примесями. В малые реки Донецкой и Луганской областей ежегодно поступает около 1,5 млн. тонн солей, что привело к обмелению рек за последние годы на один метр.

К категории основных предприятий-загрязнителей металлургической промышленности следует отнести следующие: металлургический комбинат им. Ильича и "Азовсталь" в Мариуполе, металлургический и коксохимический заводы в Енакиеве, Алчевский металлургический комбинат, Алчевский и Стахановский коксохимические заводы.

Анализ и сопоставление данных по геохимической специализации установленных природно-техногенных типов почв и основных видов минерального сырья, извлекаемого из недр и потребляемого производственными комплексами Донбасса (углей, железных и марганцевых руд, известняков доломитов и др.), а также образующихся промышленных отходов показывают, что измененные техногенными процессами почвы, как правило, унаследуют геохимическую специализацию от минерального или вторичного сырья через промышленные отходы. Таким образом, определяется причинно-следственная связь в компонентной цепи: сырьё – промышленные отходы – окружающая среда.

Программа реструктуризации угольной промышленности и, в связи с ней – закрытия шахт в Луганской и Донецкой областях явились источником непредвиденных проблем жизнедеятельности населения, которые по своей значимости вышли на один уровень с социально-экономическими вопросами региона.

Не вызывает сомнений объективность оценок ученых и специалистов относительно негативных последствий массового закрытия шахт в Луганской и Донецкой областях для состояния окружающей среды и здоровья человека, которые сводятся к следующему:

1. В результате совокупного действия негативных факторов при закрытии шахт проявляется устойчивый рост площадей территорий с активным развитием процессов подтопления жилищно-коммунальных и промышленных объектов, сельхозугодий, коммуникационных объектов, транспортных магистралей и как следствие этого активизируются процессы загрязнения поверхностных и подземных вод, оседания земной поверхности, накопления потенциальной энергии в затопленных горных выработках с формированием гидрогеомеханических напряжений и снижением стойкости породных массивов.

2. Меняется структура потоков взрывоопасных газов угольных пластов, что может усложнить газогеохимические условия действующих шахт и прилегающих промышленно-городских агломераций.

3. Практически повсеместно наблюдается геохимическое загрязнение ландшафтов промышленно-городских и сельскохозяйственных районов, выражающееся в росте концентраций тяжелых металлов, нефтепродуктов и др. в почвах, снежном покрове, донных отложениях.

4. Происходит устойчивое повышение минерализации и загрязнения нитратами, тяжелыми металлами подземных и поверхностных вод.

5. Проявляется на отдельных участках радиохимическое загрязнения почв и подземных вод уран-радийсодержащими минералами, в основном, в зонах влияния шламо-накопителей.

Выводы. Исследования почв, рек, растений, аэрозольных выпадений и медико-биологические исследования промышленных агломераций Донбасса свидетельствуют об актуализации проблем обеспечения жизнедеятельности населения, а их решение должно осуществляться посредством научного подхода к изучению их причин.

Основными направлениями в решении проблемы являются:

- Уменьшение и уничтожение опасных отходов;
- Утилизация и уничтожение отходов промышленного комплекса;
- Снижение сбросов загрязненных вод от промышленных предприятий и в коммунальном секторе;
- Развитие природно-заповедного фонда области;
- Экологическое образование, работа с общественными организациями, международное сотрудничество в области экологии.

Л и т е р а т у р а

1. Зубков Р.М., Аверин Г.В. Энергетические проблемы деминерализации шахтных вод / Зубков Р.М., Аверин Г.В. // Зб. допов. I Міжн. наук. конф. асп. та студ. «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів» – Т.1. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – С. 90-91.

2. Кононов И.Ф., Кононова Н.Б., Денщик В.А. Кризис и самоорганизация; Шахтерские города Донбасса в период реструктуризации угольной промышленности: социальное и экологическое измерения / Кононов И.Ф., Кононова Н.Б., Денщик В.А. – Луганск: Альма-матер, 2001.

3. Материалы «Годового отчета Госуправления экологии и природных ресурсов в Луганской области о состоянии окружающей природной среды за 2000 год».

4. Несмашная А.Е., Андреева Н.А. Динамика почвенных процессов в условиях подтопления шахтными водами / Несмашная А.Е., Андреева Н.А. // Матер. наук.-практ. конф. «Екологічна безпека техногенно перевантажених регіонів та раціональне використання надр», 17-21 вересня 2001 року, АР Крим, м. Коктебель.

R e f e r e n c e s

1. Zubkov P.M., Averin G.V. Jenergeticheskie problemy demineralizacii shahtnyh vod / Zubkov P.M., Averin G.V. // Zb. dopov. I Mizhn. nauk. konf. acp. ta stud. «Ohorona navkolishn'ogo seredoviwa ta racional'ne vikoristannja prirodnih resursiv» – T.1. – Donec'k: DonNTU, 2002. – S. 90-91.

2. Kononov I.F., Kononova N.B., Denwik V.A. Krizis i samoorganizacija; Shahterskie goroda Donbassa v period restrukturizacii ugol'noj promyshlennosti: social'noe i jekologicheskoe izmerenija / Kononov I.F., Kononova N.B., Denwik V.A. – Lugansk: Al'ma-mater, 2001.

3. Materialy «Godovogo otcheta Gosupravlenija jekologii i prirodnih resursov v Luganskoj oblasti o sostojanii okruzhajuwej prirodnoj sredy za 2000 god».

4. Nesmashnaja A.E., Andreeva N.A. Dinamika pochvennyh processov v uslovijah podtoplenija shahtnymi vodami / Nesmashnaja A.E., Andreeva N.A. // Mater. nauk.-prakt. konf. «Ekologichna bezpeka tehnogenno perevantazhenih pegioniv ta racional'ne vikoristannja nadr», 17-21 veresnja 2001 roku, AR Krim, m. Koktebel'.

Арнаут И.Н., Гуляев В.П.

Природные аспекты безопасности жизнедеятельности Донбасса как промышленного региона Украины

У статті розглянуті фактори, що впливають на життєдіяльність населення в Донбаському регіоні, а також рекомендації з ліквідації їхніх негативних впливів на навколишнє середовище.

Ключові слова: Природне середовище, атмосфера, повітряний басейн, радіонукліди, мінералізація

Arnaut I.N., Gulyaev V.P.

Natural aspects of life safety as an industrial Donbass region of Ukraine.

In article the factors influencing ability to live of the population in the Donbass region, and also the recommendation about liquidation of their negative influences on environment are considered.

Keywords: Environment, atmosphere, air pool, радіонукліди, a mineralization

Арнаут И.Н., старший преподаватель кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Гуляев В.П., старший преподаватель кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Нечаев Г.И., доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Транспортные системы» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 629.424.1

Ю.В. Баранич, Я.К. Скліфус

м. Луганськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ СТІНКУ ЦИЛІНДРА ДВИГУНА 5Д49

Представлені теоретичні дослідження нестационарної теплопередачі через стінку циліндра двигуна 5Д49 і показано розповсюдження температурної хвилі углиб стінки для декількох гармонік.

Ключові слова: нестационарна теплопередача, двигун, стінка циліндра, теплова хвиля.

Постановка проблеми. В даний час математичне моделювання отримало широке застосування як один з шляхів визначення передавальної функції системи охолодження з метою знаходження оптимального закону регулювання. При виборі регулятора температури, розрахунку його настрійок і визначенні режимів роботи АСРТ використовують технічні і динамічні характеристики і параметри системи охолодження як об'єкту регулювання температури. Закономірності динамічних характеристик системи охолодження визначаються характеристиками відповідних його ланок: двигуна і охолоджувача, тобто залежність кількості тепла, відданого в охолоджуючу рідину від її температури [1]. Але часто при розгляді передачі тепла охолоджуючій рідині двигун приймають за теплообмінник, у якого тепло відводиться від газу в циліндрах, нагрітого до температури, яка постійна в часі, і не враховують процеси в дизелі, що носить характер теплової хвилі, а також нестационарний теплообмін в самій системі охолодження.[2] Необхідно врахувати, що в стінці двигуна температурне середовище є періодичною функцією часу. Тоді розподіл температури в стінці двигуна буде аналогічно розподілу зсуву точок, що коливаються, при розподілі хвильового процесу в пружному середовищі. Тому таку задачу називатимемо завдання на розповсюдження теплових хвиль, розуміючи останні в макроскопічному сенсі, коли температура середовища змінюється за законом простого гармонійного коливання, тобто за законом косинуса або синуса.

Результати досліджень. У нашому випадку розглядається квазістационарний стан, тобто передбачається, що процес продовжується так довго, що первинний розподіл втратив свій вплив на хід процесу (завдання без початкових умов).[5]

Представимо циліндрову оболонку радіусу R з товщиною оболонки x (рис. 1) поміщеною в середу, температура якою змінюється за законом простого гармонійного коливання

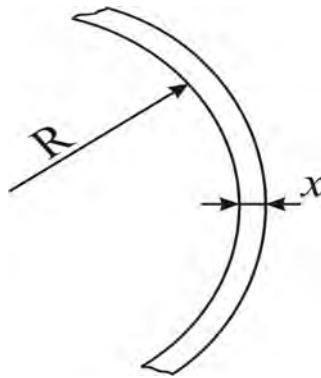


Рис. 1. Циліндрова оболонка гільзи

$$t(x, \tau) = t_f^{\max} \cos \omega \tau \text{ при } x = 0 \quad \tau > 0, \quad (1)$$

де $t(x, \tau)$ - поточна температура в перетині тіла з координатою x у момент часу τ ,
 t_f^{\max} - максимальна амплітуда періодичного коливання температури на поверхні стінки,
 ω - середня кутова швидкість обертання колінчастого валу,
 τ - поточний час.

Прийемо умовно, що відносне середнє значення температури поверхні стінки $\bar{t}_f = 0$.

Для спрощення подальших викладень початкові умови прийемо в комплексному вигляді

$$t(0, \tau) = t_f^{\max} (\cos \omega \tau + i \sin \omega \tau) = t_f^{\max} e^{i\omega \tau}. \quad (2)$$

Завдання із змінними граничними умовами, коли температура поверхні тіла змінюється згідно заданому закону як функція часу, найпростіше вирішується методом інтегрального перетворення Лапласа [6]. Згідно цьому методу помножимо обидві частини рівняння Фур'є

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}$$

на $e^{-p\tau}$ і проінтегруємо по τ у межах від 0 до ∞ тоді отримаємо

$$\int_0^{\infty} e^{-p\tau} d_{\tau} t(x, \tau) = a \frac{d^2}{dx^2} \int_0^{\infty} t(x, \tau) e^{-p\tau} d\tau. \quad (3)$$

Ліву частину рівняння (3) інтегруємо по частинах, а інтеграл в правій частині позначимо як $u(x, p)$. Підставляючи межі інтеграції і використовуючи позначення, в результаті проведених дій матимемо

$$\frac{d^2 u(x, p)}{dx^2} - \frac{p}{a} u(x, p) = -\frac{1}{a} t(x, 0), \quad (4)$$

де $u(x, p)$ - зображення по Лапласу [6] для оригіналу $t(x, \tau)$.

Рівняння описує зображення температури тіла по Лапласу у напрямі осі x залежно від початкового розподілу температури (при $\tau = 0$).

Прийmemo, що в початковий момент часу при $\tau = 0$ нестационарний процес, пов'язаний зі встановленням циклічної температури на поверхні, встиг перейти в періодичний потік стаціонарного типу. За цієї умови температура в усіх точках тіла буде постійною, тобто при $\tau = 0$ $t(x, 0) = const$

$$t(x, 0) = 0.$$

За цієї умови рівняння (4) для функції $u(x, p)$ стає однорідним:

$$\frac{d^2 u(x, p)}{dx^2} - \frac{s}{a} u(x, p) = 0. \quad (5)$$

Рішення дає

$$u(x, p) = c_1 e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} + c_2 e^{x\sqrt{\frac{p}{a}}}. \quad (6)$$

Постійна c_2 повинна дорівнювати нулю, оскільки при $x = \infty$ другий доданок нескінченно зростає, що фізично неможливе.

Тому

$$u(x, s) = c_1 e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} \quad (7)$$

при $x = 0$ $c_1 = u(0, p)$.

Отже

$$u(x, p) = u(0, p) c_1 e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}}, \quad (8)$$

де $u(0, p)$ - зображення Лапласа для оригіналу $t(0, \tau)$,

$e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}}$ - зображення [4], якому відповідає деякий (шуканий) оригінал $\psi(x, \tau)$ тобто $e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} \rightarrow \psi(x, \tau)$.

По правилах перетворення Лапласа [6]

$$e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} = \int_0^{\infty} \psi(x, \tau) e^{-p\tau} d\tau. \quad (9)$$

Права частина рівняння (8) представляє множення двох зображень. З теорії перетворень відомо, що множення зображень $f_1(p)$ і $f_2(p)$ відповідає інтегральна комбінація функцій, звана згортою функцій (оригіналів) $F_1(p)$ і $F_2(p)$, яка володіє властивостями комутативності і асоціативності [6]. Поведінка згортки абсолютно аналогічно поведінці множенню. Сказане можна представити співвідношенням

$$u(x, p) = f_1(p) f_2(p) = u(0, p) e^{-x\sqrt{\frac{p}{a}}} = \int_0^{\tau} F_1(\tau - \tau_*) F_2(\tau_*) d\tau_* . \quad (10)$$

Цій рівності відповідає вираз

$$t(x, \tau) = \int_0^{\tau} t[0, (\tau - \tau_*)] \psi(x, \tau_*) d\tau_* , \quad (11)$$

де τ_* - змінна інтеграції, тобто поточний час в інтервалі від 0 до τ .

При використанні (2), (4) і (8) рівняння (11) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} t(x, \tau) &= \int_0^{\tau} t_f^{\max} e^{i\omega(\tau - \tau_*)} \psi(x, \tau_*) d\tau_* = \\ &= t_f^{\max} e^{i\omega\tau} \left[\int_0^{\infty} e^{-i\omega\tau_*} \psi(x, \tau_*) d\tau_* - \int_{\tau}^{\infty} e^{-i\omega\tau_*} \psi(x, \tau_*) d\tau_* \right] \end{aligned} \quad (12)$$

При $\tau \rightarrow \infty$ другий інтеграл в квадратних дужках прагне до нуля, а перший інтеграл в тих же дужках згідно рівнянням (4) і (9) представляє зображення функції $\psi(x, \tau_*)$. Отже

$$t(x, \tau) = t_f^{\max} e^{i\omega\tau} e^{-x\sqrt{\frac{s}{a}}} = t_f^{\max} e^{i\omega\tau} e^{-x\sqrt{\frac{i\omega}{a}}} = t_f^{\max} e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} e^{i\left[\omega\tau - \left(\frac{\omega}{2a}\right)^{\frac{1}{2}} x\right]} .$$

Відокремлюючи речову частину по формулі Ейлера [5], отримаємо

$$t(x, \tau) = t_f^{\max} e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cos \left[\omega\tau - x \left(\frac{\omega}{2a} \right)^{\frac{1}{2}} \right] . \quad (13)$$

Вираз (13) показує, що у будь-який момент часу τ розподіл температур в тілі здійснюється за законом гармонійної температурної хвилі від місця її збудження на поверхні в глибину масиву стінки. Для будь-якого заданого часу ($\tau = const$) розподіл температури по глибині тіла відбувається за законом косинуса із затухаючою амплітудою $t_f^{\max} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$ або відношення амплітуд відповідних температур до і після стінки буде тоді рівнятися

$$\bar{A} = e^{-x\sqrt{\frac{n\pi}{a}}} , \quad (14)$$

Застосуємо отримане співвідношення до розрахунку розповсюдження температури в стінці гільзи дизеля 5Д49, для якого відомі: теплопровідність чавуну $\lambda = 21,5 \frac{Вт}{м \cdot К}$, щільність чавуну $\rho = 7500 \frac{кг}{м^3}$, теплоємність чавуну $c = 460 \frac{Дж}{кг \cdot К}$, частота обертання $n = 850 \frac{об}{мин} = 14,16с^{-1}$, коефіцієнт температуропровідності для чавуну $a = 6,23 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ [3].

Тоді з урахуванням початкових даних

$$\bar{A} = e^{-2,67x} . \quad (15)$$

Графік розповсюдження температурної хвилі углиб стінки показано на рис. 2, з якого виходить, що коливання температури основної гармоніки повністю гасяться по товщині стінки циліндра двигуна на глибині 1 мм, а для вищих гармонік гасяться інтенсивніше на глибині 0,5 мм. Тому надалі коливання температури в тілі гільзи, викликані зміною температури газу, можна не враховувати, а використовувати для розрахунку теплообміну середнє значення температури.

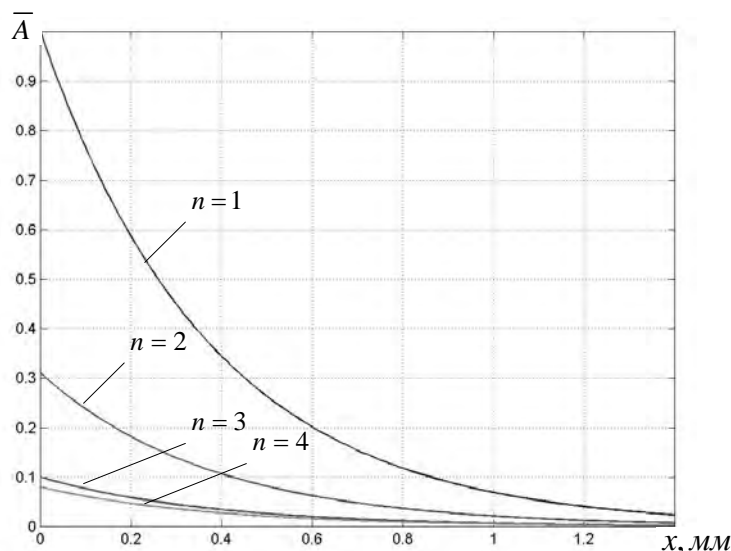


Рис. 2. Графік розповсюдження температурної хвилі углиб стінки циліндра двигуна

Висновки:

1. Розглянута динаміка теплопередачі через стінку циліндра двигуна 5Д49 і вирішено завдання на розповсюдження теплової хвилі углиб стінки на підставі фундаментальних рівнянь теплообміну і нестационарної теплопровідності.

2. Показано, що коливання температури основної гармоніки повністю гасяться по товщині стінки циліндра двигуна на глибині 1 мм, а для вищих гармонік гасяться інтенсивніше на глибині 0,5 мм.

Література

1. Луков Н. М. Основы автоматики и автоматизации тепловозов: Учебник для вузов ж.-д. Трансп. – М.: Транспорт, 1989. – 296с.
2. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М., “Энергия”. 1973. – 440с.
3. Тимченко И.И., Мац З.З. Новые методы расчетного исследования индикаторного цикла дизеля // Вестник ХНАДУ, № 2, 2004.
4. Жигулев В. Н., Папков С. Б. Математическое моделирование и физический эксперимент: учеб. пособие / Московский физико-технический ин-т (гос. ун-т). - М., 2001. - 114с.: рис. - Библиогр.: с.112.
5. Барсуков С. И., Кнауб Л. В. Термодинамика и теплопередача: учеб. пособие. - 3.изд., доп. - О.: Астропринт, 2003. - 608с.
6. Совместное применение преобразования Лапласа и проекционных методов к решению нестационарных задач теплопроводности / П.В. Цой, В.П. Цой // Пробл. машиностроения. - 2002. - N 2. - с. 50-61.

References

1. Lucow N. M. Bases of automatics and automation of diesel locomotives: the Textbook for high schools of the Railway Transport – М.: «Транспорт», 1989. – 296 p.
2. Rotach V. Y. Calculation of dynamics of industrial automatic systems of regulation. М.: “Энергия”. 1973. – 440 p.
3. Timchenko I.I., Mats Z.Z. New methods of settlement research of a display cycle of a diesel engine // Вестник ХНАДУ, № 2, 2004.
4. Zhigulev V. N, Papkov S.B. Mathematical modeling and physical experiment: the manual / the Moscow physicochemical institute (st. University). - М., 2001. – 114 p.
5. Badgers S. E, Knaub L.V. Thermodynamics and a heat transfer: the manual. - О.: “Астро-принт”, 2003. – 608 p.
6. Joint application of transformation of Laplasa and projective methods to the decision of non-stationary problems of heat conductivity / P.V.Tsoy, V.P.Tsoy// Mechanical engineering Problems. - 2002. - N 2. - p. 50-61.

В статье представлены теоретические исследования нестационарной теплопередачи через стенку цилиндра двигателя 5Д49 и показано распространение температурной волны вглубь теплопроводящей стенки для нескольких гармоник.

Ключевые слова: нестационарная теплопередача, двигатель, стенка цилиндра, тепловая волна.

The article describes theoretical investigations of transient heat conduction through cylinder wall of engine 5D49 and distribution of temperature wave deep into cylinder wall for several harmonics.

Key of words: non-stationary heat transfer, engine, cylinder wall, temperature wave.

Баранич Ю. В., к.т.н., доц. кафедры залізничного транспорту Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ);

Скліфус Я. К., аспірант кафедри залізничного транспорту Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: *Чернецька-Білецька Н.Б.*, д.т.н., проф. кафедри «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті» Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ).

УДК 622.831

В.А. Вишневский, А.В. Вишневский, А.А. Кочевский, Е.Ю. Чалая

г. Луганск

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕСКРИПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

Решая прикладные задачи в реальном масштабе времени, исследователь должен выбрать не только тактику, обеспечивающую минимум интегральной (суммарной) погрешности, но и решать, с достаточной надежностью, проблему реактивности и надежности метода. Проводя мониторинг за средой и объектом, по минимуму информации, используя принцип «чёрного ящика», необходимо создавать программы, наделенные элементами искусственного интеллекта. Базируется такая реализация на современных информационных технологиях, включающих в себя принцип обратной связи, математическое программирование (МП), имитационное моделирование, конфигурационное управление. В представленной работе приведены некоторые модельные задачи и результаты имитационных экспериментов. Обсуждаются достоинства и сфера приложения численного анализа на этапах алгоритмизации и программирования задач. Найдена возможность автоматически минимизировать издержки при решении профессионально-ориентированных задач, имитируя функции пользователя ЭВМ. Для сложных процессов, каким является процесс решения задач на ЭВМ, предложен алгоритм его коррекции - имитационные эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: имитация, дескриптивная модель, интегральная погрешность, аппроксимация, дифференциальное уравнение.

Несмотря на высокую производительность современных ЭВМ, в связи с недопустимой интегральной погрешностью, решить сложную научную или исследовательскую задачу триботехники [1] без больших суммарных затрат практически невозможно. Современные принципы управления сложными процессами позволяют создавать математические модели, которые достаточно точно имитируют функции исследователя, выступающего в качестве пользователя ЭВМ. Такая имитация должна иметь гибкие количественные показатели [2] и нетрадиционные способы формализации функционально-целевых и причинно-следственных отношений [3], с использованием нелинейного математического программирования [4]. Настало время, когда автоматическое принятие решений в виртуальной среде и в виртуальном эксперименте, выходит на передний план. Общеизвестно, что экспериментальные данные, иногда предпочтительны расчётным данным (человеческий фактор!). Надо признать, что вышеуказанное предпочтение имеет место быть потому, что погрешность ММ (ε_{MM}) превышает неустраняемую погрешность данных, полученных в ходе корректно поставленного натурального эксперимента ($\varepsilon_{ЭД}$). В этом случае ММ необходимо или заменить, или адаптировать эмпирическими поправками, цель которых скорректировать дефекты теории, т.е. необходимо решить задачу регрессионного анализа. Наоборот, если $\varepsilon_{MM} < \varepsilon_{ЭД}$ и исследователь располагает набором ММ, возникает задача выбора, т.е. отдать предпочтение той ММ, которая скомпенсирует (минимизирует) отклонение факторов реального объекта от факторов идеального объекта. Имея оптимальную базу знаний, естественно сконструировать как виртуальный объект, так и среду его функционирования. Очень важны ещё два вида погрешности: (ε_M) - погрешность метода и (ε_B) - вычислительная погрешность.

Решая задачи в реальном масштабе времени, мы должны выбрать тактику, обеспечивающую минимум интегральной погрешности (ε_{II}). Мониторинг за средой и объектом, позволяет собрать достоверную информацию, а принцип «чёрного ящика» вынуждает нас создавать модули по автоматическому приятию решений, т.е. наделять систему элементами искусственного интеллекта. Чтобы создавать и эксплуатировать такие системы, профессионал, помимо базового образования, должен знать возможности ЭВМ, т.е. знать среду, в которой функционирует программный продукт. Возникает вспомогательная задача поиска оптимальных моделей с минимальной интегральной погрешностью расчетов [5] и высокой производительностью уже на стадии алгоритмизации и кодирования. Путём анализа выявляются изъяны в выражениях и способах хранения данных и принимаются решения по их ликвидации.

Первая модельная задача. Начнём, следуя [3] с использования реактивности и стандартной процедуры TIME(h,m,sec,ms), чтобы убедиться в том, что ПЭВМ имеет недостаточное быстродействие (скорость вычислений) даже для простых (учебных) задач. Вычислим сумму ряда Лейбница – Грегори, который известен своей медленной сходимостью:

$$S = 4 \sum_{i=0}^N \frac{(-1)^i}{(2i+1)} \approx \pi . \quad (1)$$

Задав, например, $N = 1.0e7, 1.0e8, 1.0e9, 1.0e10$, получим приближения:

(3.141592753589783240, 3.141592663589793240, 3.141592654589793240, 3.141592653989793240).

Отметим, что неверная (отмеченная размером) цифра в гордом одиночестве (изолирована и отличается от точной ровно на единицу). Соответственно, получено время счёта (0.49 сек, 5.16 сек, 51.74 сек, 517.84 сек), т. е. увеличивая N на порядок – мы затратили на счёт также на порядок больше секунд. Если мы ошибочно потребуем точность результата в 17 верных знаков, то ответ получим почти через два века. Полученные результаты настораживают. Уже простая перегруппировка слагаемых в исходном ряде улучшает сходимость:

$$S = 4 \left(\sum_{i=0}^{k-1} \frac{(-1)^i}{(2i+1)} + \frac{(-1)^k}{2k+1} s + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=Q}^{Q+(2k-1)} \frac{(-1)^i}{(2i+1)} \right) \quad (2)$$

где k задаём так, чтобы минимизировать реактивность программы вычисления, а $Q = (2k+1)j+k+1$. Как легко заметить в скобках уравнения (2) исходный ряд

представлен тремя слагаемыми: суммой, $\frac{(-1)^k}{2k+1}$ долей исходного ряда и новым рядом в

виде двойной суммы. В итоге мы получаем возможность находить легко программируемый массовый алгоритм со значительно большей скоростью сходимости. Действительно при $k=1$ получаем (2) в виде

$$S = 1 - \frac{1}{3}s + \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{7}\right) + \left(-\frac{1}{11} + \frac{1}{13}\right) + \left(\frac{1}{17} - \frac{1}{19}\right) + \dots \quad (3)$$

и, наконец, имеем:

$$S = 3 \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{i+1}}{(6i-1)(6i+1)} \right) \approx \pi$$

Итак, получен знакопеременный ряд, который сходится значительно быстрее (1). Заданное k определяет тактику вычислений – это уже алгоритм для автоматического получения рабочих формул. Очевидно, что преобразование можно продолжить, задавая k и уточняя конечный результат до разумных пределов. Из той же формулы (3)

немедленно получается, полезная для практики, рекуррентная формула: $s_{n+1} = a - \frac{1}{3}s_n$,

где, в нашем случае,

$$a = \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{2(-1)^{i+1}}{(6i-1)(6i+1)} \right).$$

Чтобы распараллелить вычисления по формуле (1), если того требует алгоритм решаемой задачи, необходимо, следуя [3], представить (1) в виде двойной суммы:

$$S = 4^* \sum_{j=1}^Q \sum_{i=0}^M \frac{(-1)^{r-1}}{(2^* r + 1)}, \quad (4)$$

где $Q \cdot M = N$, $r = J + i \cdot Q$, а Q - число параллельных вычислений. Необходимо отметить, что представление отрезка ряда (1) в виде суммы (4) используется авторами не только для ускорения счёта за счёт проведения параллельных вычислений, но и для представления альтернативных знаний и данных. Например, для определения местоположения «орбит» наибольших пятен контакта, осуществляющих квантовые добавки в температуру фрикционных тел, а также местоположения тех выступов на накладке, которые участвуют в подогреве тормоза (это координаты поверхности, в которых интегрируется температура).

Вторая модельная задача.

Вторая модельная задача, включённая в анализатор, представлена уравнением:

$$s = \frac{(a+b)^2 - 2ab - b^2}{a^2} \quad (5)$$

Результат очевиден: $s \equiv 1$. Обратим внимание на то, что по уравнению (5), в результате вычислительного эксперимента мы практически всегда получаем неверный результат (не равный 1). Для определённости рекомендуем задавать $b \gg 1$ генератором псевдослучайных чисел равномерно распределённых (расположенных) на произвольном отрезке $[c, d]$ (это - любая часть диапазона представления вещественных чисел). Такие эксперименты породили задачу имитации процесса вычисления выражений на ЭВМ с тем, чтобы выявлять подобные ситуации и принимать соответствующее решение: модифицировать выражение и (или) сообщить пользователю о ситуации в выражении, связанной с вычислительной погрешностью.

Но нас интересует результат вычислений по этой формуле на ЭВМ, когда $b \gg a$. Чаще всего такое отношение малых величин (в (5) это значение a^2 , вычисленное в числителе приближённо) встречается при конечно-разностной аппроксимации производных при решении дифференциальных уравнений в частных производных. Трудности возникли при решении параболического разностного уравнения (уравнение Фурье)[3]. Здесь, для определённости, рассмотрим вторую производную. В этой ситуации возникает локальная задача выбора оптимального шага для разделенной разности (численная производная): $f''_q(x, h) = (f(x+h) - 2f(x) + f(x-h))/h^2$.

Воспользуемся для аналитической производной выражением

$$f''_A(x) = f''_q(x, h) + r_1(\xi, h) + r_2(x, h), \quad (6)$$

где $r_1(\xi, h) = -f^{IV}(\xi)h^2/12$ - остаточный член численного дифференцирования (производная вычисляется в специально подобранной точке ξ);

$r_2(x, h) = E(x)/h^2$ - дополнительное слагаемое, порожденное интегральной погрешностью вычисления $f(x) \pm E(x)$.

Значения $r_1(h, \xi)$ и $r_2(x, h)$ практически невозможно вычислить, но их суммарное значение $R(x, h)$, если известна левая часть уравнения (6), можно выразить непосредственно по формуле: $R(x, h) = f''_A(x) - f''_q(x, h)$ (7).

В свою очередь, если неизвестна (по постановке задачи она неизвестна) левая часть в (6), то необходимо $f(x)$ заменить адекватной функцией, для которой вычисление второй производной не представляет труда. В качестве модельной задачи в данной процедуре используется или сама функция, или ее полиномиальная аппроксимация. Далее, задавая равномерный шаг табулирования, пассивным поиском определяем h , при котором $R(x, h)$ принимает наименьшее значение.

Часто приходится использовать только значение функции $f(x)$ - типичная ситуация в многомерном поиске. В этой ситуации возникает локальная задача выбора оптимального шага h , для численных производных $f'_q(x, h)$ и $f''_q(x, h)$. Целевая функция задачи НМП, например, для первой производной запишется так: $\min_h \text{abs}(f'_A(x) - f'_q(x, h))$, где $f'_A(x)$ - аналитическая производная или её аппроксимация. На рис. 3 представлены результаты вычислительного эксперимента в логарифмическом масштабе (основание логарифма 15/14, которое переводит отрезок $[0.1e-17, 0.1]$ соответственно в отрезок $[-600, -32]$). Если мы перенесём точку -600 в 0, получим отрезок $[0, 568]$, целые значения которого будут, в виде натуральных чисел, номерами пикселей экрана по оси абсцисс.

На рисунке по оси ординат отложены значения $e^{\varepsilon_1(x, h)}$ и $\lg(\varepsilon_i(x, h))$ для обеих производных, вычисленные при двух значениях аргумента: $x = 2, 6$. Область оптимальных значений h для аппроксимаций первой и второй производных значительно отличается. При выборе масштабов изображений рисунка, мы руководствовались тем, что $h \approx \varepsilon$. Алгоритм построения и масштабирования рисунка обусловлен тем, что $h \approx R(x, h)$, т.е. $0.1e-7 \leq (R(x, h), h) \leq 0.1$. Из графика явно видна зависимость $h(x)$, поэтому, на практике, нами используется приближённая оценка по формуле $h = (1 + 0.01 \text{abs}(x)) \times 1.0e-5$, чтобы автоматически отслеживать область допустимых значений. На наш взгляд, во всех сложных ситуациях, которые возникают в численных аппроксимациях, h необходимо вычислять в динамике, решая задачу на экстремум.

Например, при интегрировании системы дифференциальных уравнений, в систему вводим дополнительное уравнение с точным решением с тем, чтобы формализовать задачу. Так, для метода Рунге - Кутты четвёртого порядка, целевая функция минимизи-

рует по h , разность приращения функции с взвешенной суммой четырёх дифференциалов, т.е. псевдодифференциалом (его параболической аппроксимацией).

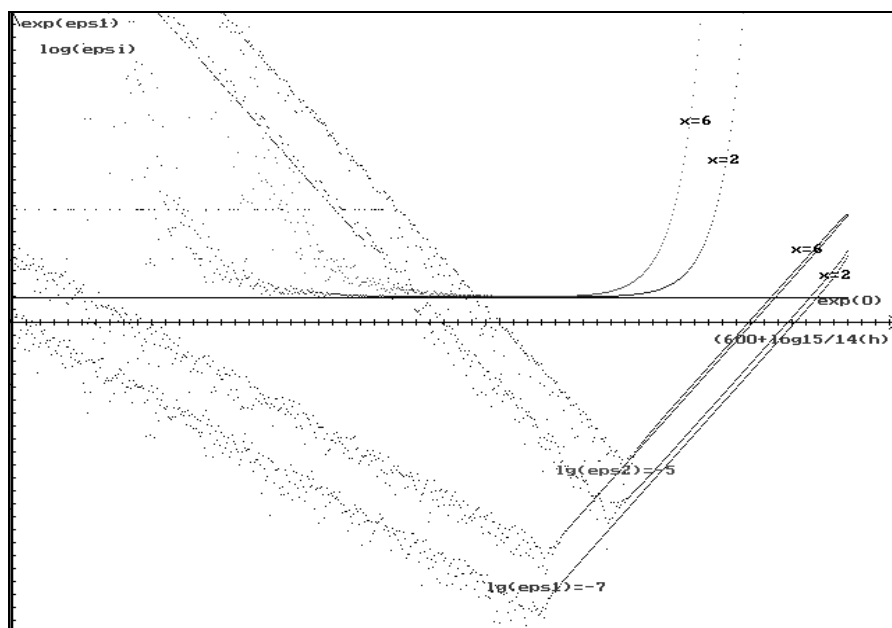


Рис. 3. График абсолютной ошибки аппроксимации производных: $f'_4(x, h)$ в двух масштабах и $f''_4(x, h)$ - только в логарифмическом масштабе

К сожалению, многие авторы, решая уравнения в частных производных методом сеток, задают $h \gg h_{opt}$. Вычислительные эксперименты показали, что интегральная погрешность будет приемлемой, если $h \in [0.1e-6, 0.1e-3]$, но при этом надо помнить, что размерность линейной системы будет большой. Т.е. возрастёт погрешность прямых методов решения специализированной (тридиагональной) системы линейных уравнений, а это уже другая проблема, которую не просто решить (на тестовых задачах выручают итерационные методы).

Третья модельная задача – вычисление интегральной функции с высокой точностью для заданной области значений аргумента:

$$J(n) = \frac{1}{e} \int_0^1 e^x x^n dx, \text{ где } n = \overline{1, N}. \quad (7)$$

В конечных квадратурах этот интеграл не берётся, поэтому первое что приходит на ум, проинтегрировать по частям (7) и получить рекуррентное выражение:

$$J(n) = 1 - nJ(n-1) \quad (8)$$

Куда проще, имея $J(0)=1-1/e$, по формуле (6) получать $J(1), J(2), J(3), \dots$. Однако мы терпим полное фиаско: уже при $n > 20$ значение $J(n)$ неограниченно растёт по модулю. Анализируя (8) мы видим, что $J(n)$ положительноопределённая и монотонно убывающая функция. Легко получить, зная $J(0)$ и $J(1)$, выражение при $n \gg 2$:

$$J(n) = (-1)^{n+1} \frac{n!}{S e}, \quad (9)$$

где $S = \sum_{i=2}^n (-1)^{n-i} \frac{n!}{i!}$. По формуле (9) уже можно считать с предельно допустимой

точностью, если бы можно было хранить S и $n!$ точно. Заметим, что слагаемые меняют не только знаки, но и численные значения, а их значения близки к значению $n!$. Таким

образом, в памяти хранятся, в большинстве своём, цифроразряды не содержащие информации о значении $J(n)$. Дробная часть слагаемых создаёт катастрофическую ситуацию в вычислениях по формуле (8), т.к. имея малое число верных знаков, умноженных на $n!$ даёт неверный результат. Далее предлагается хранить в памяти ЭВМ не само значение $n!$, но набор показателей степеней первых простых чисел в разложении по ним $n!$, не превышающих n . Операции деления и умножения заменять, соответственно, вычитанием и сложением этих наборов показателей, т.е. переходим к операциям над логарифмами. Приведём результат операции деления $29!$ на $25!$, иллюстрирующий вышесказанное. Для этого случая достаточно первых десяти простых чисел:

(2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29)

$29! = 8841761993739701954543616000000 = (25, 13, 6, 4, 2, 2, 1, 1, 1, 1)$

$25! = 15511210043330985984000000 = (22, 10, 6, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 0)$

$29!/25! = 570024 = (3, 3, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1)$.

Итак:

$29!/25! = 2^{25-22} \cdot 3^{13-10} \cdot 5^{6-6} \cdot 7^{4-3} \cdot 11^{2-2} \cdot 13^{2-1} \cdot 17^{1-1} \cdot 19^{1-1} \cdot 23^{1-1} \cdot 29^{1-0} =$

$2^3 \cdot 3^3 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 29$.

Здесь иллюстрируется потребность не только в модификации выражений, но и в способах хранения данных, что влечёт за собой изменение операций над этими данными. Очевидно, что S представляем также, как и $n!$ набором показателей степеней первых простых чисел для вычислений по (9), но S может быть единственным простым числом намного превышающим максимальное простое число, использованное на первом этапе. Заметив влияние $N!$ на точность вычислений, выразив J_{N-1} через J_N в формуле (8), мы получаем новую рекуррентную формулу, которая, в данной задаче, решает проблему точности вычислений:

$$J_{N-1} = (1 - J_N) / N \quad (10).$$

Задав $J_N = 1/N$, будем изменять N , например, от 75 до 0 с шагом -1 получим значение $J_0, J_1, J_2, J_3, \dots, J_{50}$ с предельно допустимой точностью. Удачное и в тоже время грубейшее начальное приближение выбрано, с учётом результатов анализа степенной функции, входящую в суперпозицию подынтегрального выражения. Численные методы Гаусса и Симпсона вносят свою погрешность, с которой также сложно бороться при минимизации суммарной погрешности.

Четвертая модельная задача – сглаживание и интерполирование данных, полученных в натурном эксперименте. Задача представляет практический интерес в связи с тем, что она частично решает проблему борьбы с неустранимой погрешностью ε_H . Пусть повысить класс точности датчиков, используемых в эксперименте, нам не удалось, тем более остались расчёты исследователя, например, на логарифмической линейке. Тогда, мы имеем k серий из N экспериментов, представленных парами чисел y_i, x_i , где $i = \overline{0, N}$. Допустим, нам удалось, получить итоговую функцию, например, пусть это будет $f(x) = 1/(1+x^2)$. На рис. 2 изображены:

- ♦ y_i , для $N = 16$ одной из серий, причём x_i находится в центре горизонтальных отрезков $y_i = const$;
- ♦ интерполяционный многочлен Лагранжа (линия переменного цвета);
- ♦ сама функция (известная, как «Локон Аньези») $f(x) = 1/(1+x^2)$.

На рисунке линию кубического сплайна не изображали, так как она очевидна. По определению, это кубические параболы, соединяющие точки y_i, x_i и y_{i+1}, x_{i+1} , где $i = \overline{0, 16}$, при этом сохранялась как неустранимая погрешность $\varepsilon_H(x_i)$, так и непрерывность их первых производных в узлах. Для наглядности, на отрезке $[-3, 3]$ в точках $X_i = -3 + hi$, где $i = \overline{0, 16}$ а $h = 0.375$, изображены $y(x) = y_i = const$, где

$x \in [x_i - h/2, x_i + h/2]$. Очевидно, что все три линии совпадут, когда $y_i - f(x_i) = 0$, отсюда однозначность и управляемость формализации. Все изъяны налицо, поэтому актуальной становится работа по созданию системы автоматического проведения такого рода работ. Таким образом, нам удалось затронуть ряд проблем вычислительной математики, с которыми приходится повседневно встречаться пользователю ЭВМ при решении своих задач. В общем случае для оптимизации интегральной погрешности проблемно-ориентированных задач требуется решить до четырёх задач на экстремум, если удастся разделить базовую целевую функцию $\min_{\varepsilon_{MM}, \varepsilon_{MET}, \varepsilon_H, \varepsilon_B} \varepsilon_H$ на четыре.

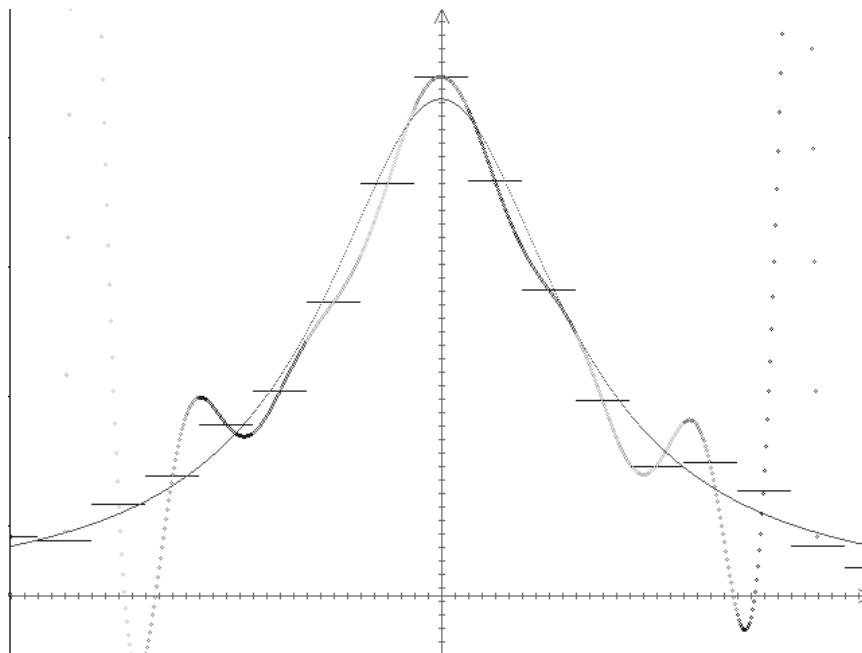


Рис. 2. Интерполирование

Итак, мы предлагаем исследователю инструмент в виде имитационной системы для поиска эффективных алгоритмов и оптимальных математических моделей в автоматическом режиме. На практике, результаты исследования проведенного авторами, показывают, что необходим мониторинг за вычислительным процессом. Адаптированные модельные задачи и тесты обеспечивают систему надёжной информацией. Предлагаемый нами подход базируется на теории конфигурационного управления, что обеспечивает решение проблем по устройству исследуемых фрагментов программ, по целеполаганию, по введению и снятию тех или иных ограничений, по способу воздействия на вычислительный процесс. Для сложных процессов, каким является процесс решения задач на ЭВМ, предложен алгоритм его коррекции - имитационные эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода. Такая система с гибким конфигурационным модулем может быть включена в библиотеку стандартных программ языков программирования высокого уровня.

Л и т е р а т у р а

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
2. Вишневский В.А., Стеценко В.Г. Программная оценка производительности вычислительных систем. // Вычислительные комплексы интегрированных информационных систем: Межвузовский сборник. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1985. - С 3 - 7.
3. Вишневский А.В. Стохастическая модель контакта двух шероховатых тел и расчет распределения температуры в каждом из них. // Вісник Східноукраїнського Національного Університету. - 2003. - №1 (1). - С.45.

4. Мину М. Математическое программирование. - М.: Наука, 1990. - 123 с.
5. Бахвалов Н Численные методы, М.: Наука, т.1, 1975.

References

1. Garkunov D.N. Tribotekhnika. - M.: Mashinostroyeniye, 1985. - 424 s.
2. Vishnevskij V.A., Stecenko V.G. Programmnaia ocenka proizvoditel'nosti vychislitel'nykh sistem. // Vychislitel'nye komplekсы integrirovannykh informacionnykh sistem: Mezhdvuzovskij sbornik. - Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 1985. - S 3 - 7.
3. Vishnevskij A.V. Stokhasticheskaia model' kontakta dvuh sherohovatykh tel i raschet raspredeleniia temperatury v kazhdom iz nih. // Visnik Shidnoukraïns'kogo Nacional'nogo Universitetu. - 2003. - №1 (1). - S.45.
4. Мину М. Математическое программирование. - М.: Наука, 1990. - 123 с.
5. Bahvalov N Chislennye metody, M.: Nauka, t.1, 1975.

Вишневецький В.А., Вишневецький О.В., Кочевський А.О., Чала О.Ю.

Оптимізація дескриптивні моделі

Вирішуючи прикладні задачі в реальному масштабі часу, дослідник повинен вибрати не лише тактику, що забезпечує мінімум інтегральної (сумарної) погрешності, але і вирішувати, з достатньою надійністю, проблему реактивності і надійності методу. Проводячи моніторинг за середовищем і об'єктом, по мінімуму інформації, використовуючи принцип «чорного ящика», необхідно створювати програми, наділені елементами штучного інтелекту. Базується така реалізація на сучасних інформаційних технологіях, що включають принцип зворотного зв'язку, математичне програмування (МП), імітаційне моделювання, конфігураційне управління. У представленій роботі приведені деякі модельні завдання і результати імітаційних експериментів. Обговорюються достоїнства і сфера додатка чисельного аналізу на етапах алгоритмізації і програмування завдань. Знайдена можливість автоматично мінімізувати витрати при рішенні професійно-орієнтованих завдань, імітуючи функції користувача ЕОМ. Для складних процесів, яким є процес рішення завдань на ЕОМ, запропонований алгоритм його корекції - імітаційні експерименти підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: імітація, дескриптивна модель, інтегральна похибка, апроксимація, диференціальне рівняння.

Vishnevskij V.A., Vishnevskij A.V., Kochevskij A.A., Chalaya E.Yu.

Optimizing descriptive models

Deciding the applied real-time problems, a researcher must choose not only tactics, providing a minimum of integral (total) error but also to decide, with sufficient reliability, the problem of reactivity and reliability of method. Conducting monitoring after an environment and object, on a minimum of information, using principle of «black box», it is necessary to create the programs, provided with the elements of artificial intelligence. Such realization is based on modern information technologies, pluggings in itself principle of feed-back, mathematical programming (MT), imitation design, configuration management. Some toy problems over and results of imitation experiments are brought in the presented work. Dignities and sphere of application of numerical analysis come into question on the stages of algorithmization and programming of tasks. Possibility automatically to minimize costs at the decision of the professionally-oriented tasks is found, imitating the functions of the computer user. For difficult processes, what a process of decision of tasks is on computer, the algorithm of its correction is offered - imitation experiments confirm efficiency offered approach.

Keywords: imitation, descriptive model, integral error, approximation, differential equalization.

В.А. Вишневецький – к.ф.-м.н., доцент каф. «Автоматика и телемеханика» Чебоксарского государственного университета им. В.Ульянова (г. Чебоксары);

А.В. Вишневецький – ассистент каф. «Прикладная математика» Восточногоукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

А.А. Кочевський – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Прикладная математика» Восточногоукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Е.Ю. Чала – ассистент каф. «Прикладная математика» Восточногоукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Грибанов В.М., д.т.н., проф. кафедры «Прикладная математика» Восточногоукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФИЗИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ВИБРО-УДАРНОИМПУЛЬСНОГО УПЛОТНЕНИЯ

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований по установлению особенностей механизма физического модифицирования бетонной смеси в процессе вибро-ударноимпульсного уплотнения

Обоснована целесообразность применения высокоинтенсивного вибро-ударноимпульсного способа уплотнения бетонной смеси с одновременным удалением из неё избыточной воды затворения.

Показано, что процесс начального виброуплотнения, отжима воды и водовоздушной фазы, а также последующего вибро-ударноимпульсного уплотнения бетонной смеси состоит из трёх различных по механизму действия стадий.

Установлено, что при физической модификации бетонной смеси с применением вибро-ударноимпульсного способа уплотнения происходит изменение морфологии гидратированного вяжущего в сравнении с бетоном, получаемым по традиционной технологии.

Ключевые слова: модифицированный бетон, цементная матрица, отжим, уплотнение, перфорированная опалубочная форма, прочность, эффективный модуль упругости.

Актуальность исследований и постановка проблемы. В результате аналитического обзора установлено, что физико-механические характеристики бетона, кроме активности цемента и вида заполнителей определяются величиной водоцементного соотношения (В/Ц) бетонной смеси [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Зависимость прочности и водонепроницаемости бетона от (В/Ц) вытекает из физической сущности формирования структуры бетона. Изучение процесса гидратации цемента показало, что цемент, в зависимости от качества и срока твердения, связывает всего, 15 - 25 % воды от своей массы [11, 12, 13]. В течение первого месяца связывается не менее 20 % воды от массы цемента. Вместе с тем, для придания бетонной смеси пластичности, улучшения условий гидратации вяжущего, вводится значительно большее количество воды, так как при $(В/Ц)_{нач} = 0,20$ бетонная смесь остается практически сухой и её невозможно качественно уложить, отформовать и уплотнить. Избыточная вода затворения, не вступая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. Несомненно, это является основной причиной снижения прочности и водонепроницаемости бетона.

Для образования смеси заданной удобоукладываемости и оптимальных условий гидратации вяжущего необходимо применение бетонных смесей с повышенным влагосодержанием. Образование оптимальной бетонной смеси, возможно, на основе применения цементного теста, разжиженного водой относительно теста нормальной густоты. Величина разжижения Z определяется из зависимости:

$$Z = \frac{1}{[В/Ц]} - \frac{1}{(В/Ц)_{нач}}, \quad (1)$$

где $[В/Ц]$ – водоцементный фактор цементного теста нормальной густоты;
 $(В/Ц)_{нач}$ – начальное водоцементное соотношение данного цементного теста или бетонной смеси.

В этом случае создаются благоприятные условия для гидратации вяжущего, оптимизируется структурообразование и, в частности, снижается объём воздушных пор.

Однако, для оптимизации свойств бетона, получения предельной прочности необходимо удалить избыточную воду затворения. Физико-механические показатели бетона

при этом будут находиться в прямой зависимости от количества остаточной воды затворения [1]. Если бетонная смесь будет уплотняться за счёт отжатия определенного количества свободной воды, то прочность бетона будет находиться в обратной функциональной зависимости от остаточного (В/Ц), так как именно оно определяет пористость цементного камня и бетона. Поэтому, с целью получения бетона предельно высокой прочности и плотности, предварительно уложенная смесь должна дополнительно уплотняться в условиях максимального обезвоживания бетона.

Для предварительного выявления факторов, влияющих на обезвоживание, рассмотрим процесс уплотнения бетонной смеси, уложенной в опалубочную форму, представляющую цилиндр со сплошной стенкой. Предположим, что смесь подвергается сжатию нормальным давлением, приложенным к поршню. Если объём цементного раствора ($V_{ц.р.}$), имеющегося в бетонной смеси, окажется меньше объёма пор ($V_{пор.}$) между зёрнами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято только крупным заполнителем, а цементный раствор не воспримет в этом случае никакого давления. Влияние вибро-ударноимпульсного уплотнения в этом случае, вероятно, будет отрицательным, так как под действием нормальной силы возможны случаи раздробления отдельных зёрен крупной фракции, которое приведёт к снижению прочности бетона.

Если $V_{ц.р.} = V_{пор.}$ между зёрнами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято зёрнами всех компонентов бетонной смеси. В этих условиях эффект вибро-ударноимпульсного уплотнения будет иметь неустойчивый характер.

Если $V_{ц.р.}$ будет на определённую величину больше $V_{пор.}$, то нормальное давление будет воспринято только цементным раствором, и эффект вибро-ударноимпульсного уплотнения будет зависеть от способности цементно-песчаного раствора деформироваться. Раствор будет деформироваться, если количество цементного теста будет больше объёма пор мелкого заполнителя. В этих условиях вся нагрузка будет воспринята цементным тестом. При избыточном количестве воды в цементном тесте вся нагрузка будет воспринята водой.

Таким образом, для повышения эффективности уплотнения вибро-ударноимпульсным способом необходимо, чтобы цементное тесто являлось средой, в которой располагались бы зёрна крупного и мелкого заполнителей.

При полной герметичности опалубочной формы смесь уплотняется только за счёт некоторого уменьшения объёма вовлеченного воздуха, то есть эффект вибро-ударноимпульсного способа уплотнения будет незначительным. Этот эффект будет повышаться с увеличением водопроницаемой способности стенок перфорированной опалубочной формы, так как при наличии фильтрационных отверстий свободная вода под действием разности напора внутри формы и за его пределами начнёт перемещаться в сторону фильтрационных отверстий.

Итак, в процессе удаления избыточной воды затворения и вовлеченного воздуха частицы цемента начнут сближаться между собой, что, в свою очередь, приведёт к сближению зёрен крупного и мелкого заполнителей. Нормальное давление, передающееся на воду и вызывающее её удаление, будет способствовать сближению частиц до тех пор, пока внешнее давление полностью воспримется дисперсной фазой.

Продолжительность вибро-ударноимпульсного уплотнения бетонной смеси до требуемой плотности, при переменной величине нормального давления, вероятно, будет зависеть от количества и водопроницаемой способности фильтрационных отверстий, с увеличением которых продолжительность уплотнения смеси будет снижаться [14, 15, 16].

Вышеизложенные доводы позволяют предположить, что наиболее эффективное уплотнение бетонной смеси вибро-ударноимпульсным способом будет достигнуто при следующих условиях:

а) абсолютный объём раствора в бетонной смеси должен превышать объём пор межзернового пространства крупного заполнителя в среднем на 20-30 %. Это будет способствовать устранению образования жесткого несжимаемого крупнозернистого скелета;

б) объём цементного теста в бетонной смеси должен превышать объём пор межзернового пространства мелкого заполнителя на 30-40 %, что исключает передачу нагрузки от одних зёрен песка непосредственно на другие;

в) фильтрационная способность стенок перфорированных опалубочных форм, внутри которых бетонная смесь уплотняется вибро-ударноимпульсным способом, должна отвечать требованиям максимального обезвоживания за сравнительно короткий срок уплотнения.

В соответствии с вышеизложенным, эффективность уплотнения бетонной смеси вибро-ударноимпульсным способом зависит от её состава, от фильтрационной способности стенок перфорированных опалубочных форм, внутри которых осуществляется уплотнение, а также от уровня и режима уплотнения.

В результате анализа современных технологий установлено, что физическая модификация бетонной смеси возможна путём удаления избыточной воды затворения, добавляемой в бетонную смесь для придания ей необходимой текучести и удобоукладываемости.

Удаление свободной воды затворения в процессе уплотнения бетонной смеси увеличивает использование потенциальных свойств цемента для повышения плотности, водонепроницаемости и прочности бетона. В настоящее время, в технологии сложных элементов известно несколько способов обезвоживания бетонной смеси, в частности: центрифугирование, прессование, вакуумирование, вибропрессование. Однако одним из наиболее эффективных способов следует считать предлагаемый способ вибро-ударноимпульсного уплотнения, так как при этом могут быть созданы необходимые условия для максимального обезвоживания бетонной смеси.

Таким образом, можно предположить, что высокопрочный бетон, применяемый, в частности, для изготовления малонапорных труб может быть получен за счёт уплотнения смеси вибро-ударноимпульсным способом с интенсивным обезвоживанием.

При производстве бетонных труб вибро-ударноимпульсным способом уплотнения удаление избыточной воды затворения из бетонной смеси осуществлялось через конусные отверстия перфорированных опалубочных форм.

Цель и объект настоящих исследований состоит в изыскании таких фильтров, которые бы имели простую, легкодоступную в производственных условиях конструкцию, и отжимали бы из бетонной смеси избыточную воду затворения за сравнительно незначительный отрезок времени.

Материалы и результаты исследований. Основную роль в формировании предельно-плотной структуры бетона играет процесс обезвоживания бетонной смеси. Отжим излишней воды затворения из бетонной смеси под действием приложенного нормального давления является фильтрационным процессом [1, 17]. Большую роль в нём играют разность химических потенциалов взаимодействующих фаз и различные градиенты, возникающие в системе в зависимости от вида источника энергии, под влиянием которой перемещается излишняя вода затворения. Перемещение её под действием градиента влажности происходит в сторону менее увлажнённых пор до полного выравнивания влажности.

Следовательно, для удаления излишней воды затворения из бетонной смеси под действием давления необходимо совершить работу (расход энергии) на преодоление сил связи воды с частицами цемента и на перемещение её в системе. Естественно, что основная задача исследования переноса излишней воды затворения из бетонной смеси заключается в определении зависимости скорости фильтрации от различных технологических параметров и величины нормального давления.

Из гидродинамики жидкости известно, что в движущемся потоке падение давления прямо пропорционально его скорости. Очевидно, что при удалении излишней воды затворения из бетонной смеси, в ней давление также должно снижаться под действием внешней нормальной нагрузки. Следовательно, надо полагать, что при движении излишней воды затворения в пространстве между сольватированными частицами цемента в пограничных диффузных слоях будет создаваться разность давлений.

Молекулы воды в диффузных слоях испытывают действие сил, направленных к поверхности твёрдой фазы, величина которых убывает с увеличением расстояния от поверхности частиц. При определённой скорости удаления излишней воды затворения в потоке может возникнуть отрицательное давление такой величины, когда равнодействующая сил, одна из которых притягивает молекулы воды к твердой поверхности, а другая втягивает её в движущую струю, окажется направленной от твердой поверхности. В этом случае ориентированные молекулы воды в диффузном слое выйдут из сферы влияния сил притяжения и будут вовлечены в движущийся поток.

При восприятии внешней сжимаемой нагрузки системой нейтральных давлений в воде, заполняющей поры бетонной смеси, возникает гидростатическое давление, которое сразу же передается на прилегающие зёрна заполнителя и по мере сжатия смеси у стенки конусного вибросердечника опытно-промышленной установки распространяется на следующие слои бетонной смеси. В связи с этим, гидростатическое давление в бетонной смеси уменьшается на величину соответственно той части полного давления, которое испытывают зёрна заполнителя, расположенные на определённой глубине от поверхности конусной части вибросердечника.

При вибро-ударном воздействии импульсных волн уплотнения на бетонную смесь в ней возбуждаются собственные колебания зёрен заполнителей, которые, в свою очередь, приводят к определённому разжижению цементного теста и перераспределению в нём жидкости. В вязкопластичном цементном тесте смеси возникает турбулентный гидродинамический процесс, который под влиянием импульсного волнового давления сопровождается отжатием избыточной воды затворения из ближе расположенных к вибросердечнику слоёв смеси, что приводит к её уплотнению. В этих случаях образуются направленные к наружной форме фильтрационные каналы, по которым под действием вибро-ударноимпульсного уплотнения удаляется излишняя вода затворения. Наружная и внутренняя перфорированные опалубочные формы, в свою очередь, имеют многочисленные специально устроенные фильтрационные конусные отверстия.

Весь процесс начального виброуплотнения, отжим воды и водовоздушной фазы, а также последующего вибро-ударноимпульсного уплотнения бетонной смеси можно представить как комплексный трёхступенчатый процесс. Этот процесс носит сложный характер и состоит из трёх различных по механизму действий стадий.

Стадия перекомпоновки составляющих (первая стадия уплотнения) заключается в разрушении и перекомпоновке под влиянием вибрирования неустойчивой структуры скелета заполнителей бетонной смеси. Образующие её зёрна в момент разрушения структуры под влиянием собственной массы стремятся занять наиболее низкое положение, меняют взаимную ориентацию и образуют новую устойчивую структуру. В ней зёрна заполнителей размещены уже не случайно, а наиболее выгодно по условию получения минимального объёма скелета. Одновременно с перекомпоновкой скелета удаляется основная масса воздуха через фильтрационные конусные отверстия перфорированных опалубочных форм. После окончания первой стадии воздуха остается не более 3-4 % от общего объёма бетонной смеси.

Рассматривая особенности поведения бетонной смеси на первой стадии виброуплотнения, можно заметить, что процесс перекомпоновки составляющих интенсивно протекает лишь при отсутствии значительных статических нагрузок на смесь. Это создает условия оптимальной перекомпоновки составляющих бетонной смеси. Как показывают опыты, время, необходимое для завершения первой стадии уплотнения в активных «виброкипящих» слоях бетонной смеси, относительно невелико и даже для жестких смесей не превышает 20-30 с.

Стадия сближения составляющих (вторая стадия уплотнения) начинается в момент, когда перекомпоновка структуры бетонной смеси под влиянием вибрирования закончилась и после этого изменения в ней порядка расположения зёрен заполнителей обычными средствами практически неосуществимо. В проведенных опытах: сближения, раздвижки, относительные сдвиги частиц заполнителей происходят в результате перераспределения по объёму растворной составляющей и цементного теста из-за удаления

остаточной части воздуха, а также избыточной воды затворения через фильтрационные конусные отверстия перфорированных опалубочных форм. В отличие от первой, вторая стадия уплотнения интенсивно протекает в предельно стесненных условиях, под действием приложенного комбинированного вибро-ударноимпульсного внешнего силового фактора.

Для завершения второй стадии необходимо более длительное время, чем для первой. Продолжительность этой стадии зависит от жесткости бетонной смеси, толщины стенки получаемого изделия, режима вибро-ударноимпульсного уплотнения, фильтрационной способности перфорированных опалубочных форм и начального значения (В/Ц). Например, при изготовлении неармированных бетонных труб (диаметром 1000 мм, длиной 15000 мм и толщиной стенки 150 мм) из умеренно жестких смесей стадия сближения составляющих продолжалась 3-5 мин., то есть почти на два порядка больше первой стадии. Завершение второй стадии четко определяется окончанием значительных деформаций бетонной смеси, после чего структура свежего бетона может считаться сформировавшейся. Дальнейшее вибрирование практически не повышает плотности и прочности бетона, а также не улучшает качество его поверхности.

Стадия комплексного уплотнения бетонной смеси (третья стадия уплотнения). Опыты показывают, что после окончания второй стадии уплотнения ещё можно достичь некоторого дополнительного (компрессионного) обжатия путём сочетания интенсивного вибро-ударноимпульсного давления со сдвиговым возвратно-поступательным перемещением наружной перфорированной опалубочной формы относительно вибросердечника. Так как эта операция осуществляется без прекращения вибровоздействия, то полезный эффект в виде повышения прочности и плотности бетона достигается за сравнительно короткое время, 1-3 мин. Рассматриваемый эффект достигается в результате отжатия остаточной части избыточной воды затворения с растворённым в ней воздухом, а также предельного уплотнения контактов между зёрнами заполнителей.

Из вышеизложенного видно, что процесс уплотнения бетонной смеси на разных стадиях подчиняется различным закономерностям. На первой стадии бетонная смесь ведёт себя как вязко-сыпучая среда, подвергаемая вибрационным перемещениям. На второй стадии, сопротивляясь смыканию составляющих и отжиму водовоздушной фазы, смесь реагирует на внешнее уплотняющее воздействие, как вязкоупругое тело, характеризующееся определённым модулем упругости. На третьей стадии решающее значение приобретает оптимальное сочетание фильтрационных свойств бетонной смеси и перфорированных опалубочных форм. В этом случае свежее заложённая смесь деформируется по законам динамики многокомпонентной среды.

Следует обратить внимание на качественное различие между виброуплотнением бетонной смеси и вибро-ударноимпульсным её уплотнением в рассматриваемом случае. Обычное одностадийное уплотнение заменяется высокоинтенсивным трехстадийным вибро-ударноимпульсным уплотнением, в результате которого коэффициент уплотнения $K_{упл} = \gamma_{опыт} / \gamma_{теор} \rightarrow 1$ начинает стремиться к теоретически возможному значению, равному единице. Трёхстадийное вибро-ударноимпульсное уплотнение будет особенно эффективным при получении бетонной смеси оптимальной вибровязкости, упругости и способности поглощения энергии при колебаниях. Этот важный вывод определяет необходимость разработки надёжного метода назначения составов бетона, отвечающих заданным условиям. При этом, учитывая исследования [18], бетонную смесь можно представить как вязкую жидкость с постоянным коэффициентом вязкости.

Кроме определения оптимального состава бетона, необходимо определить также физико-механические характеристики бетонной смеси и бетона. Наиболее просто определяется интегральная характеристика деформативности бетона. Для этого рассмотрим описанную выше первую стадию уплотнения бетонной смеси.

Рассмотрим осевую деформацию столба бетонной смеси, содержащей пузырьки воздуха и находящейся в первой стадии уплотнения (рис. 1). Берём за основу условие, согласно которому при заполнении опалубочной формы бетонной смесью вовлекается (на единицу высоты) объём воздуха равный V_0 . Указанному выше характеру распределения пор в изделии это условие не противоречит. В таком случае на первой стадии уп-

лотнения смеси содержание воздуха изменяется по высоте, и на некотором расстоянии (x) от поверхности составит:

$$V_x = \frac{1}{(1 + \rho \cdot g \cdot x / P_{\text{атм}})}, \quad (2)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление;
 ρ – плотность смеси;
 g – ускорение свободного падения.

Приложим к поверхности столба бетонной смеси некоторое дополнительное давление P , тогда, на основании физического закона Бойля-Мариотта ($P \cdot V = \text{const}$), можно записать:

$$(\rho \cdot g \cdot x + P_{\text{атм}}) \cdot V_0 \cdot \frac{1}{(1 + \rho \cdot g \cdot x / P_{\text{атм}})} = (\rho \cdot g \cdot x + P_{\text{атм}} + P) \cdot (V_0 - V) \cdot \frac{1}{(1 + \rho \cdot g \cdot x / P_{\text{атм}})}, \quad (3)$$

где V – величина, на которую уменьшается объём воздушных включений при приложении давления P .

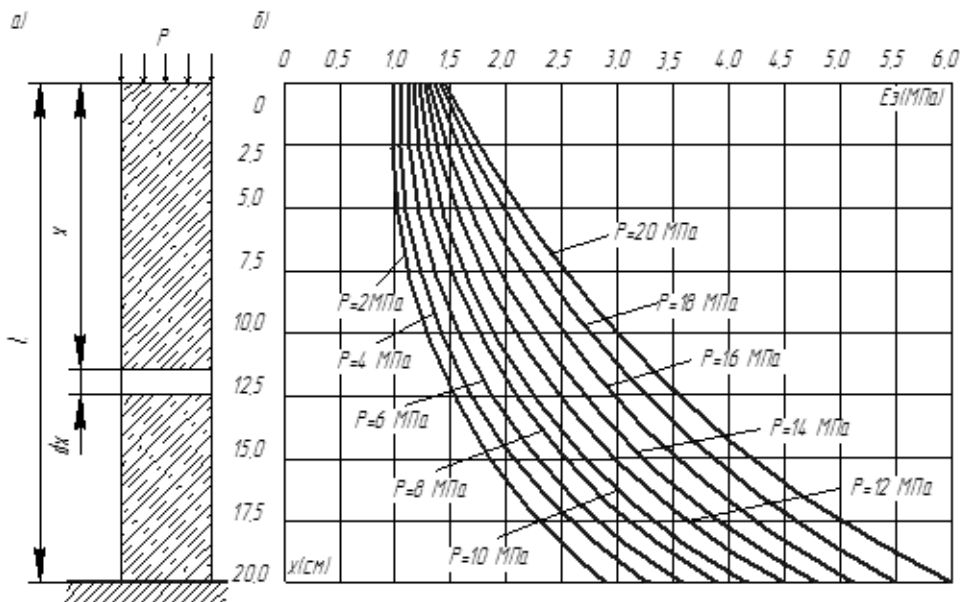


Рис. 1. Вспомогательный график для определения эффективного модуля упругости E_s ;
 а) – исходная расчетная схема; б) – кривые зависимости $E_s(x)$

Из (3) нетрудно получить зависимость между V и P :

$$V = \frac{P \cdot V_0}{(\rho \cdot g \cdot x + P_{\text{атм}} + P)}. \quad (4)$$

При $P \ll \rho \cdot g \cdot x + P_{\text{атм}}$ выражение (4) можно заменить приближенной линейной зависимостью:

$$V \approx \frac{P \cdot V_0}{(\rho \cdot g \cdot x + P_{\text{атм}})}. \quad (5)$$

Таким образом, при нагружении столба бетонной смеси, находящейся в условиях одномерной деформации, например, уложенной в опалубочную форму постоянного сечения, равномерно распределенной осевой нагрузкой можно рассматривать смесь как квазиупругое тело с некоторым эффективным модулем упругости $E_3(x)$. Сравнивая формулу (5) с известной формулой для определения деформации упругого стержня под воздействием осевой нагрузки (то есть с законом Гука $E = \sigma / \epsilon$), получим формулу для определения эффективного модуля упругости $E_3(x)$ бетонной смеси на расстоянии (x) от верха столба:

$$E_3(x) = \frac{P_{\text{атм}} \cdot (1 + \rho \cdot g \cdot x)^2}{\epsilon_0}, \quad (6)$$

где $\epsilon_0 = V_0/V_c$ – отношение начального объёма воздуха, вовлеченного при укладке бетонной смеси, к полному объёму смеси V_c вибрируемого изготавливаемого изделия.

Для практических целей усредненное значение E_3^* , вычисляется по формуле:

$$E_3^* = \frac{1}{h} \int_0^h E_3(x) \cdot dx = \frac{P_{\text{атм}}}{h \cdot \epsilon_0} \cdot \int_0^h \left(\frac{1 + \rho \cdot g \cdot x}{P_{\text{атм}}} \right)^2 \cdot dx = \frac{v \cdot P_{\text{атм}}}{\epsilon_0}, \quad (7)$$

где v – определяется по формуле:

$$v = 1 + \frac{\rho \cdot g \cdot h}{P_{\text{атм}}} + \frac{1}{3} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot h}{P_{\text{атм}}} \right)^2. \quad (8)$$

График для определения коэффициента v , входящего в выражение (7), представлен на рис. 2.

В табл. 1 приведены опытные данные деформативности различных типов бетонных смесей и величины усреднённого эффективного модуля упругости E_3^* . Из приведенных данных видна тенденция к росту модуля упругости с увеличением крупности заполнителя, что объясняется различной способностью смесей вовлекать и удерживать воздух.

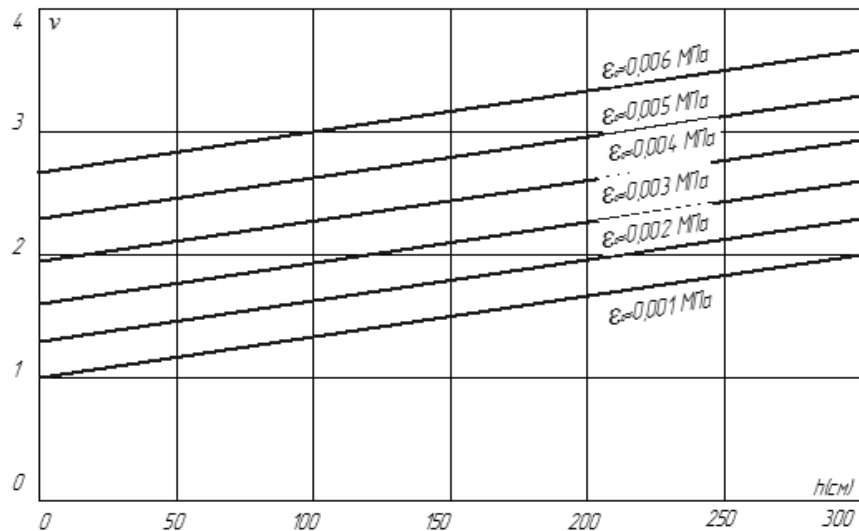


Рис. 2. График для определения коэффициента v

**Опытные данные деформативности различных типов бетонных смесей
и величины усреднённого эффективного модуля E_3^***

Тип смеси	Характеристика смеси	E_3^* МПа	ε_0	ε_k
I	Мелкозернистые бетоны	1 - 2	0,12 - 0,09	–
II	Мелкозернистые бетоны ($d_{\max} = 10$ мм)	2 - 4	0,11 - 0,08	–
III	Тяжелые бетоны ($d_{\max} = 20$ мм)	3 - 6	0,10 - 0,06	–
IV	Бетоны, уплотненные вибро-ударноимпульсным способом ($d_{\max} = 10$ мм)	3 - 6	0,09 - 0,06	0,03 - 0,05
V	Бетоны, уплотненные вибро-ударноимпульсным способом ($d_{\max} = 20$ мм)	4 - 7	0,04 - 0,03	0,02 - 0,04

Также большое значение имеет способность бетонной смеси поглощать энергию при вибро-ударноимпульсных воздействиях. Раскрытие этой закономерности позволяет прогнозировать технологические параметры уплотнения. Однако в настоящее время эта способность изучена недостаточно, что обуславливается сложностью механизма деформирования рассматриваемой среды, сопровождающегося внутренним трением зёрен заполнителя, течением цементного теста и потерями энергии в результате объёмных деформаций воздушных включений.

Анализируя данные различных экспериментальных исследований [18, 19], можно заключить, что на современном этапе в данном контексте можно пользоваться вязкоупругой моделью:

$$\sigma = E_3^* \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (9)$$

где η – коэффициент вязкого сопротивления, определяемый опытным путём.

Для бетона уплотнённого вибро-ударноимпульсным способом упругая часть напряжений ($E_3^* \cdot \varepsilon$) значительно превосходит вязко-пластичную компоненту напряжений. По окончании уплотнения модифицированный бетон ведёт себя как твердое тело.

Выводы. На основании результатов экспериментально-теоретических исследований:

1. Обоснована целесообразность применения высокоинтенсивного вибро-ударноимпульсного способа уплотнения бетонной смеси с одновременным удалением из неё избыточной воды затверения.

2. Определено, что процесс начального виброуплотнения, отжима воды и водовоздушной фазы, а также последующего вибро-ударноимпульсного уплотнения бетонной смеси состоит из трёх различных по механизму действия стадий.

3. Установлено, что при физической модификации бетонной смеси с применением вибро-ударноимпульсного способа уплотнения происходит изменение морфологии гидратированного вяжущего в сравнении с бетоном, получаемом обычным вибрированным методом.

Л и т е р а т у р а

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Стройиздат, 1978. – 455 с.
3. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1984, – 95 с.
4. Осмаков С.А., Брауде Ф.Г. Виброударные формовочные машины. – Л.: Стройиздат, 1986. – 128 с.
5. Попов А.П., Ционский А.Л., Хрипунов В.А. Производство железобетонных напорных виброгидропрессованных труб. – М.: Стройиздат, 1987 – 273 с.

6. Сизов В.Н., Киров С.А., Попов Л.Н. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1972. – 518 с
7. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Технопроект. – 1998. – 768 с.
8. Шейнич Л.А., Попруга П.В. Высокопрочные бетоны для монолитного домостроения / Будівельні конструкції: збірник наукових праць. – К.: НДІБК, 2007. – С. 311-314.
9. Трощенко В.Т. и др. Прочность материалов и конструкций. – К.: Академперіодика. – 2005. – 1088 с.
10. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат, 1990. – 316 с.
11. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 672 с.
12. Горчаков Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
13. Комар А.Г., Баженов Ю.М., Сулименко Л.М. Технология производства строительных материалов. – М.: Высш. школа, 1984. – 408 с.
14. Пилипенко В.Н. «Закономерности структурообразования модифицированной матрицы коррозионностойкого бетона» // Вісник Східноукраїнського національного університет ім. Володимира Даля, № 1 [155] ч. 1, 2011. С. 171-174.
15. Пилипенко В.Н. «Технологические особенности формирования осесимметричных неармированных бетонных труб» // Вісник Східноукраїнського національного університет ім. Володимира Даля, № 2 [156] ч. 2, 2011. С. 207-214.
16. Пилипенко В.Н. «Исследование влияния конструктивных и геометрических характеристик перфорированных опалубочных форм на модификацию бетонной смеси и бетона» // Вісник Східноукраїнського національного університет ім. Володимира Даля, № 4 [158] ч. 2, 2011. С. 144-153.
17. Берг О.Я., Писанко Г.Н., Хромец Ю.П. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1979. – 208 с.
18. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей. – Л.: Стройиздат, 1986. – 280 с.
19. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. М.: Стройиздат, 1982. – 150 с.

References

1. Ahverdov I.N. Osnovy fiziki betona. – М.: Strojizdat, 1981. – 464 s.
2. Bazhenov Ju.M. Tehnologija betona. – М.: Strojizdat, 1978. – 455 s.
3. Berg O.Ja. Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona. – М.: Strojizdat, 1984, – 95 s.
4. Osmakov S.A., Braude F.G. Vibroudarnye formovochnye mashiny. – L.: Strojizdat, 1986. – 128 s.
5. Popov A.P., Cionskij A.L., Hripunov V.A, Proizvodstvo zhelezobetonnyh napornyh vibrogidropressovannyh trub. – М.: Strojizdat, 1987 – 273 s.
6. Sizov V.N., Kirov S.A., Popov L.N. Tehnologija betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. – М.: Strojizdat, 1972. – 518 s
7. Batrakov V.G. Modificirovannye betony. Teorija i praktika. – М.: Tehnoproekt. – 1998. – 768 s.
8. Shejnich L.A., Poprugа P.V. Vysokoprochnye betony dlja monolitnogo domostroenija / Budiveln'i konstrukcii: zbirnik naukovih prac'. – К.: NDIBK, 2007. – S. 311-314.
9. Trowenko V.T. i dr. Prochnost' materialov i konstrukcij. – К.: Akademperіodika. – 2005. – 1088 s.
10. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl' P. Dolgovechnost' zhelezobetona v aggressivnyh sredah. – М.: Strojizdat, 1990. – 316 s.
11. Bazhenov Ju.M., Komar A.G. Tehnologija betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. – М.: Strojizdat, 1984. – 672 s.
12. Gorchakov G.I. Sostav, struktura i svojstva cementnyh betonov. – М.: Strojizdat, 1976. – 145 s.
13. Komar A.G., Bazhenov Ju.M., Sulimenko L.M. Tehnologija proizvodstva stroitel'nyh materialov. – М.: Vyssh. shkola, 1984. – 408 s.
14. Pilipenko V.N. «Zakonomernosti strukturoobrazovanija modificirovannoj matricy korrozionnostojkogo betona» // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitet im. Volodimira Dalja, № 1 [155] ch. 1, 2011. S. 171-174.

15. Pilipenko V.N. «Tehnologicheskie osobennosti formovaniya osesimmetrichnyh nearmirovannyh betonnyh trub» // Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitet im. Volodimira Dalja, № 2 [156] ch. 2, 2011. S. 207-214.
16. Pilipenko V.N. «Issledovanie vlijaniya konstruktivnyh i geometricheskikh harakteristik perforirovannyh opalubochnykh form na modifikaciju betonnoj smesi i betona» // Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitet im. Volodimira Dalja, № 4 [158] ch. 2, 2011. S. 144-153.
17. Berg O.Ja., Pisanko G.N., Hromec Ju.P. Vysokoprochnyj beton. M.: Strojizdat, 1979. – 208 s.
18. Savinov O.A., Lavrinovich E.V. Vibracionnaja tehnika uplotnenija i formovaniya be-tonnyh smesej. – L.: Strojizdat, 1986. – 280 s.
19. Rudenko I.F. Formovanie izdelij poverhnostnymi vibroustrojstvami. M.: Strojizdat, 1982. – 150 s.

Пилипенко В.М.

Особливості механізму фізичного модифікування бетонної суміші в процесі віброударної імпульсної ущільнення

В статті представлені результати експериментально-теоретичних досліджень із визначення особливостей механізму фізичного модифікування бетонної суміші в процесі віброударної імпульсної ущільнення.

Обґрунтована доцільність застосування високоінтенсивного вібро-ударної імпульсної способу ущільнення бетонної суміші з одночасним видаленням з неї надлишкової води замішування.

Показано, що процес початкового віброущільнення, віджимання води та водоповітряної фази, а також подальшого вібро-ударної імпульсної ущільнення бетонної суміші, складається з трьох різних за механізмом дії стадій.

Встановлено, що при фізичній модифікації бетонної суміші із застосуванням віброударної імпульсної способу ущільнення відбувається зміна морфології гідратованого в'язучого у порівнянні з бетоном, який виробляється за традиційною технологією.

Ключові слова: модифікований бетон, цементна матриця, віджимання, ущільнення, перфорована опалубна форма, міцність, ефективний модуль пружності.

Pilipenko V.N.

The peculiarities of mechanism of physical modification of concrete mixture in the process of vibro impact poly-roll

The results of experimental theoretical investigations regarding the definition of peculiarities of mechanism of physical modification of concrete mixture in the process of vibro impact poly-roll are introduced in the article.

It was proved the practicability of the usage of high intensive vibro impact method of compression of concrete mixture with the simultaneous removal of surplus water of gauging from it.

It is shown that the process of initial vibro compression, water removal and air-and-water phase, including the next vibro impact compression of concrete mixture consists of three different stages according to the mechanism of action.

It was established that at physical modification of concrete mixture with the usage of vibro impact method of compression takes place the change of morphology of hydrated binding in comparison with the concrete obtained by the traditional technology.

Key words: modified concrete, cementing matrix, removal, compression, perforated concrete form, strength, modulus of rupture.

Пилипенко В.Н. – к.т.н., доцент кафедри городского строительства и хозяйства Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (г. Луганск).

Рецензент: *Руденко Н.Н.*, д.т.н., проф., заведующая кафедрой городского строительства и хозяйства, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля (г. Луганск).

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА

Предлагается не связанный с динамическим синтезом итерационный метод динамического анализа рычажного механизма. Рис. 2, Ист. 3.

Как известно, для решения задачи динамического анализа механизма, необходимо знать параметры его динамической модели (угловую скорость, приведённый момент инерции, изменение кинетической энергии) хотя бы в одном положении, определённом обобщённой координатой [1, 2]. Традиционные методы в учебной литературе предлагают в качестве такого положения использовать то, где угловая скорость звена приведения имеет задаваемое коэффициентом неравномерности движения экстремальное значение. Но обеспечение заданного коэффициента неравномерности движения является условием динамического синтеза механизма, который не всегда необходим. Таким образом, оказывается, что без динамического синтеза, когда этот коэффициент не известен и его только предстоит определить, динамический анализ невыполним. Возможность определения закона движения начального звена в этом случае открывает нетрадиционный подход к решению задачи динамического синтеза [3].

На рисунке 1 в системах координат $JO\varphi$ и $\Delta AO\varphi$, где φ - обобщённая координата, изображены кривые соответственно $J = J(\varphi)$ приведённого момента инерции механизма и $\Delta A = \Delta A(\varphi)$ суммарной работы на участке, соответствующем одному периоду установившегося движения.

Пусть приведённый момент инерции рычажного механизма будет представлен следующим образом:

$$J(\varphi) = J_{const} + J_{var}(\varphi),$$

где J_{const} - постоянная составляющая, выделенная таким образом, что переменная составляющая $J_{var}(\varphi)$ имеет своим минимумом 0;

После исключения постоянной составляющей J_{const} приведённого момента инерции, перейдя к новой системе координат $J_{var}O_1\varphi$, можно записать:

$$J_{var}(\varphi) = J(\varphi) - J_{const}$$

и

$$\Delta E(\varphi) = \Delta A(\varphi) - \Delta A^*,$$

где J_{const} - минимальное значение приведённого момента инерции в старой системе $JO\varphi$, ΔA^* - соответствующая этому значению величина суммарной работы в системе $\Delta A = \Delta A(\varphi)$, $\Delta E(\varphi)$ - переменная составляющая изменения кинетической энергии механизма в новой системе координат $\Delta EO_1\varphi$.

Точка O_2 , положение которой на оси ΔE предстоит отыскать, определяет полную кинетическую энергию механизма $E = E(\varphi)$. Эту зависимость можно представить следующим образом:

$$E = E_0 + \Delta E(\varphi) = \frac{(J_{const} + J_{var}(\varphi)) \cdot \omega^2(\varphi)}{2}. \quad (1)$$

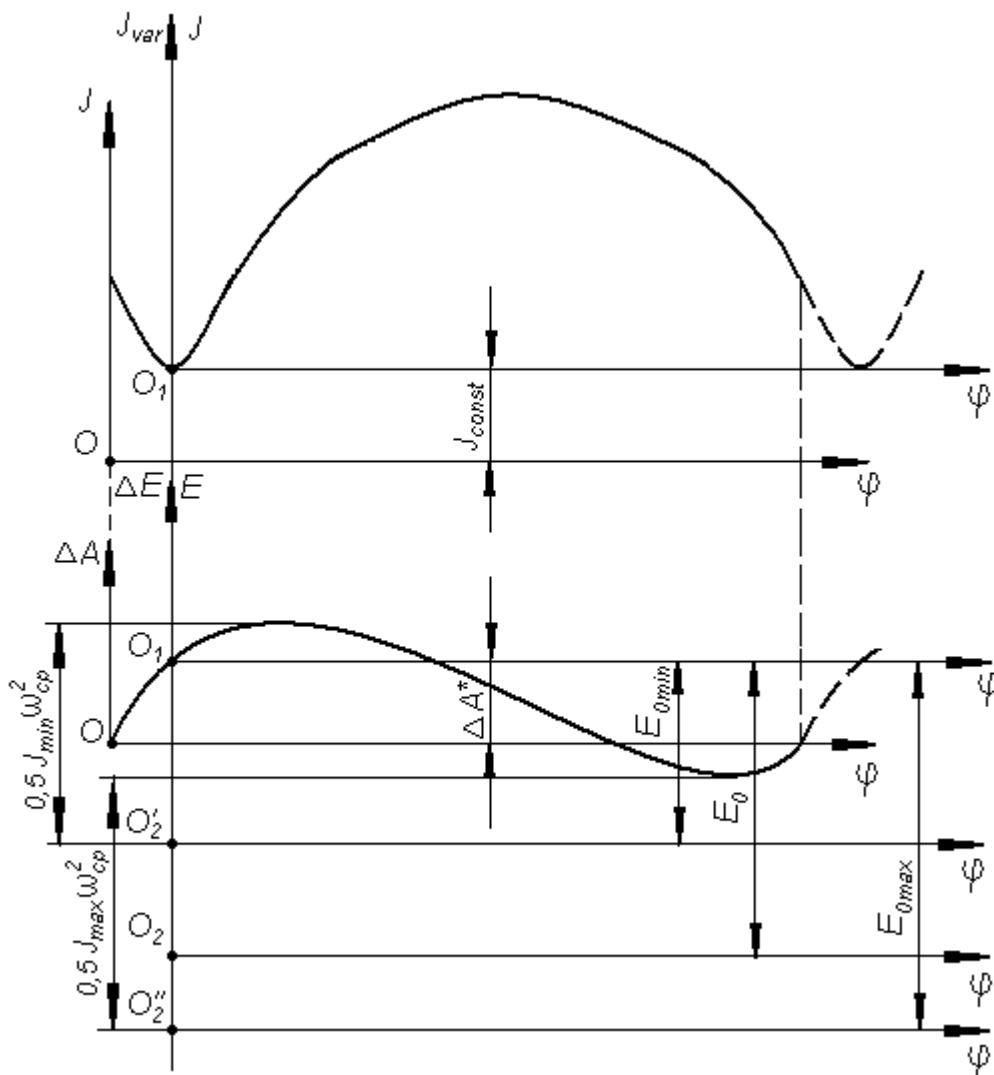


Рис. 1. К динамическому анализу механизма

Здесь $E_0 = \frac{J_{const} \cdot \omega_0^2}{2}$ - неизвестная постоянная составляющая кинетической энергии, где ω_0 - некоторая неизвестная угловая скорость при $J_{var}(\varphi) = 0$ и $\Delta E(\varphi) = 0$.

Таким образом, имея E_0 , из выражения (1) можно определить текущие значения угловой скорости:

$$\omega(\varphi) = \sqrt{\frac{2 \cdot (E_0 + \Delta E(\varphi))}{J_{const} + J_{var}(\varphi)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (E_0 + \Delta E(\varphi))}{J(\varphi)}}. \quad (2)$$

Задачу динамического анализа можно решить итерационным путём, используя полученную зависимость (2). Суть метода поясняет рисунок 1. Требуется определить положение точки O_2 на оси ΔE . Блок-схема алгоритма решения задачи приводится на рисунке 2.

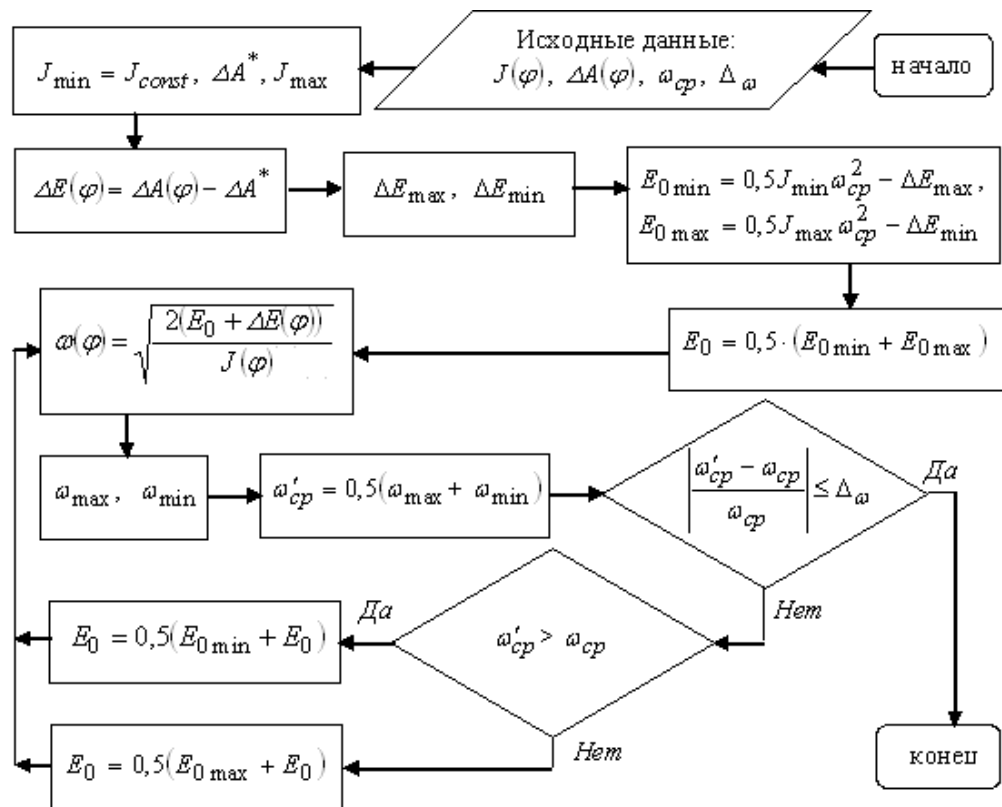


Рис. 2. Блок-схема алгоритма динамического анализа механизма

Задавшись исходными данными $J(\varphi)$, $\Delta A(\varphi)$, $\omega_{ср}$ и допуском отклонением от величины средней угловой скорости $\Delta\omega$, следует перейти из системы $\Delta A O \varphi$ в систему $\Delta E O_1 \varphi$, как описано выше. При этом определяются наименьшее значение приведённого момента инерции $J_{\min} = J_{const}$. Находятся его наибольшее значение J_{\max} , а также наибольшее ΔE_{\max} и наименьшее ΔE_{\min} значения функции $\Delta E(\varphi)$. Положение точки O_2 определяется величиной кинетической энергии E_0 , которую предлагается искать методом последовательных приближений. Очевидно, что точка O_2 располагается на отрезке $O'_2 O''_2$, границы которого O'_2 и O''_2 отстоят от верхней и нижней точек кривой $\Delta E(\varphi)$ на расстояния, что с достаточной точностью определяются величинами энергии соответственно $0,5J_{\min}\omega_{ср}^2$ и $0,5J_{\max}\omega_{ср}^2$, а от оси абсцисс системы координат $\Delta E O_1 \varphi$ величинами

$$E_{0\min} = 0,5J_{\min}\omega_{ср}^2 - \Delta E_{\max} \text{ и } E_{0\max} = 0,5J_{\max}\omega_{ср}^2 - \Delta E_{\min}.$$

На первом этапе можно принять, что $E_0 = 0,5 \cdot (E_{0\min} + E_{0\max})$. Затем по формуле (2) вычисляется угловая скорость звена привода во всех положениях механизма. Определяются её экстремальные значения и новое значение средней угловой скорости $\omega'_{ср}$. Последнее сравнивается с заданным $\omega_{ср}$. Если абсолютная относительная величина их разности превышает заданный допуск, следует найти новое положение начала O_2 сис-

темы координат $EO_2\varphi$, приняв новое значение E_0 . При этом в случае, когда $\omega'_{cp} > \omega_{cp}$, точка O_2 располагается на середине отрезка $O_2O'_2$, иначе – на середине отрезка $O_2O''_2$. Процедура повторяется. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока отклонение вычисленного значения средней угловой скорости звена приведения от заданного значения не окажется в пределах допуска.

Угловое ускорение звена приведения можно определить традиционными [1, 2] или нетрадиционным [3] методами.

В заключение - о некоторых достоинствах изложенного метода.

1. Возможность выполнения динамического анализа без динамического синтеза.
2. Возможность создания простого алгоритма для машинного счёта.
3. Преимущество по отношению к традиционным методам и основополагающим идеям.
4. Наглядность вследствие возможности применения простой графической иллюстрации.

Л и т е р а т у р а

1. Артоблевский И. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1975. - 640 с.: ил.
2. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов и др.; Под ред. К. В. Фролова. – М.: Высш. шк. 1987. – 496 с.: ил.
3. Мальков В. Н., Власова А. А. Усовершенствованный метод динамического синтеза и динамического анализа механизма [Электронный ресурс]/Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля – 2008, - № 3Е. Режим доступа к журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vusnud>

References

1. Artobolevskij I. I. Teorija mehanizmov i mashin. M.: Nauka, 1975. - 640 s.: il.
2. Teorija mehanizmov i mashin: Ucheb. dlja vtuzov / K. V. Frolov, S. A. Popov, A. K. Musatov i dr.; Pod red. K. V. Frolova. – M.: Vyssh. shk. 1987. – 496 s.: il.
3. Mal'kov V. N., Vlasova A. A. Usovershenstvovannyj metod dinamicheskogo sinteza i dinamicheskogo analiza mehanizma [Jelektronnyj resurs]/Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Dalja – 2008, - № 3E. Rezhim dostupa k zhurnalu: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vusnud>

А.О. Власова, В.М. Мальков, П.Л. Носко, В.В. Ставицкий

Метод динамічного аналізу механізму

Пропонується не пов'язаний з динамічним синтезом ітераційний метод динамічного аналізу важливого механізму. Рис. 2, Дж. 3.

A.A. Vlasova, V.N. Malkov, P.L. Nosko, V.V. Stavitsky

The method of the dynamic analysis of the mechanism

It is offered the iteration method of dynamic analysis of the planar mechanism without connection with dynamic synthesis. Fig. 2. Source 3.

Власова Алла Александровна – научный сотрудник научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Искра" (г. Луганск);

Мальков Валерий Николаевич – ассистент кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Носко Павел Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Ставицкий Валерий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Шишов В.П., доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТАВА СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ СВАРКЕ ОДНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

В статье описана методика прогнозирования состава сварочного факела при полуавтоматической сварке сталей одного структурного класса в процессе создания крупногабаритной конструкции. Ис.9.

Ключевые слова: сварка, стали, вредные и опасные факторы, вагон, прогноз, меры борьбы.

Постановка проблемы. В наши дни электросварка применяется во многих отраслях промышленности. Постоянно совершенствуются различные способы сварки, что ведет к росту числа рабочих, занятых на сварочном производстве. Все возрастающее применение существующих и внедрение новых способов сварки, наплавки и резки металлов является одним из факторов научно-технического прогресса, способствующего повышению производительности труда. Несмотря на то, что внедрение новых процессов и способов сварки (автоматической, контактной, плазменной и др.) позволило снизить вредное воздействие сварочного аэрозоля, по-прежнему широко используется ручная дуговая и полуавтоматическая сварка. Внедряются новые стали, новые марки электродов и сварочных проволок, образующийся сварочный аэрозоль неизвестен и его влияние на здоровье сварщиков непредсказуемо. В связи с этим условия труда на многих предприятиях не всегда отвечают санитарным нормам [1]. Поэтому возникла настоятельная необходимость в разработке методов прогнозирования состава сварочного аэрозоля.

Анализ последних исследований и публикаций.

Проблеме влияния вредных производственных факторов электросварочного производства на состояние здоровья рабочих посвящено большое количество исследований Е.И. Воронцова (1963г.); Л.Н. Горбаня В. А., Прилипко, В.Г. Войткевича (1986 г.); Н.Ф. Измерова (1987г.); N.H.L. Hjlunda, J.P.E. Bonde, K.S. Hansena (1994г.); Wang Zhe Pinga, K. Larssona (1994г.), А.И. Зибарева (2005г.), Левченко О.Г. (2005г.) и др. [2-5]. Установлено, что на участках сварки и резки металлов состав и масса выделяющихся вредных веществ зависит от способа сварки, режимов технологического процесса, свойств применяемых сварочных и свариваемых материалов и т.д.. Наибольшие выделения вредных веществ характерны для процессов полуавтоматической и ручной дуговой сварки покрытыми электродами. При расходе 1 кг электродов в процессе сварки стали образуется до 40 г пыли, 2 г фтороводорода, 1,5 г оксидов углерода и азота; при сварке чугунов – до 45 г пыли и 1,9 г фтороводорода.

Сварочная пыль на 99 % состоит из частиц размером 10-3...1 мкм, около 1 % – 1...5 мкм, частицы размером более 5 мкм составляют всего десятые доли процента. В состав сварочного аэрозоля входят соединения хрома, марганца, железа, фториды и др. компоненты. Валовые выделения вредных веществ при сварке оценивают в расчете на 1 кг расходуемых сварочных материалов.

При сварке легированных и нержавеющей марганцовистых сталей качественными электродами сварочный аэрозоль содержит значительное количество марганца. Распространяясь с кровью по организму, этот чрезвычайно токсичный элемент вызывает тяжелое заболевание: марганцевую интоксикацию. При этом страдает, главным образом, центральная нервная система. Изменения в организме при марганцевой интоксикации необратимы. Другие элементы сварочного аэрозоля, а также сварочные газы, способны

вызвать хронический бронхит, увеличивают риск возникновения сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, а также уменьшают продолжительность жизни.

Отрицательное воздействие на здоровье сварщиков и резчиков перечисленных выше основных факторов может сочетаться с влиянием и других вредных факторов производственной среды: шума, вибрации, неблагоприятных микроклиматических условий и т.д. В Украине функционирует ряд предприятий, которые изготавливают или ремонтируют крупногабаритные металлоконструкции; такие как вагоны для железной дороги и метрополитена, рамы автобусов и грузовиков, металлические емкости и цистерны, опоры передач, мостовые конструкции и др. Цеха имеют большие территории, на которых работает несколько десятков сварщиков. Металлоконструкции могут быть длиной до 15 м и шириной до 5 м - это зона сварки. В зоне сварки работает несколько сварщиков, которые перемещаются по зоне в любых направлениях. Поэтому применение местных малогабаритных установок очистки с передвижным отсасывающим устройством невозможно. Естественно выделения сварочных газов происходит хаотично. Цех задымляется внутри помещения, особенно в зимний период, когда закрыты все двери, стабилизируется плотный смог, затрудняющий дыхание и видимость. Сварочная пыль мелкодисперсная, скорость витания ее частиц – не более 0,08 м/с, оседание ее практически не происходит, поэтому распределение ее по высоте помещения в большинстве случаев равномерно. Основными компонентами пыли при сварке сталей являются окислы железа, а так же около 41,18% марганца и около 6% кремния. При ручной и полуавтоматической сварке в среде защитного газа концентрация сварочного аэрозоля достигает 30 мг/м³. При сварке нержавеющей сталей ситуация еще более сложная, концентрация аэрозолей содержащая значительное количество никеля, хрома, марганца, свинца составляет 53,4 мг/м³. Наибольшее накопление примесей происходит на уровне 5 м от пола. Длительная работа персонала в условиях интенсификации производства при достижении пылевыведения 20 г/кг становится невозможной и даже опасной. При внедрении новых сталей и сварочных материалов необходимо прогнозировать состав сварочного аэрозоля.

Цель данной работы заключается в разработке методики прогнозирования состава сварочного аэрозоля при сварке крупногабаритных конструкций из однородных сталей.

Материалы и результаты исследований.

Разработка методики оценки состава сварочного аэрозоля (СА) основана на экспериментальных данных полученных при изготовлении вагонов электровозов и теоретических данных накопленных сварочным производством. Нагревание, плавление и перенос электродного (присадочного) материала, а также плавление основного металла сопровождается протеканием ряда физико-химических процессов: теплопередачи, диффузии, испарения, массопереноса и т.п. Поэтому для учета изменения состава шва и основного металла применяют коэффициенты перехода (коэффициенты усвоения). Коэффициент перехода является собой коэффициент полезного использования элемента. Этот показатель определяется отношением концентрации элемента в перенесенном в ванну металла к его содержанию в исходном материале (основном и присадочном металле). Методика оценки состава СА при сварке крупногабаритных конструкций выглядит следующим образом.

1. Устанавливается химический состав основного металла и сварочных материалов (сварочной проволоки и электродного стержня).
2. Устанавливается способ сварки и характер защитной среды (РДС, полуавтоматическая в среде защитных газов или механизированная под слоем флюса).
3. Определяется тип соединения согласно ГОСТу на способ сварки.
4. Определяется положение шва при сварке (нижнее, потолочное и т. д.).
5. Определяется положение сварщика при сварке (сидя, стоя, опираясь на руку, на корточках и т.д.)
6. Оцениваются условия сварки (на открытой площадке, внутри конструкции, под конструкцией и т.д.).

7. По справочным данным устанавливаются коэффициенты перехода по отдельным элементам для выбранного способа сварки).

8. Устанавливается химический состав шва с учетом испарения. Содержание элемента Э в шве можно представить в виде:

$$[\text{Э}] = \gamma_{\text{Э}} \cdot [\text{Э}]_0 \eta_{\text{Э}} + (1 - \gamma_{\text{Э}}) \cdot [\text{Э}]_{\text{Э}} \eta_{\text{Э}}, \quad (1)$$

где $\eta_0, \eta_{\text{Э}}$ - коэффициенты перехода элемента из основного и электродного металла соответственно; $[\text{Э}]_0, [\text{Э}]_{\text{Э}}$ - содержание элемента в основном металле и электроде.

γ - доля участия основного металла в металле шва (устанавливается на образцах свидетелях или определяется расчетом).

Чаще всего в расчетах величиной η_0 пренебрегают. Значение коэффициентов перехода $\eta_{\text{Э}}$, для некоторых случаев дуговой сварки приведенные в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Коэффициент перехода $\eta_{\text{Э}}$ некоторых элементов для разных способов дуговой сварки

Способ сварки	Коэффициенты перехода по элементам			
	C	Mn	Si	O
Сварка на воздухе без защиты:				
Проволокой Св-08А	0,3-0,4	0,39-0,56	-	-
Проволокой Св-18ХГСА	0,29-0,34	0,63-0,69	0,5-0,87	0,9-0,95
Сварка в среде Со2:				
Проволокой 12Х18Н9Т	-	0,78	0,78	0,94
Проволокой Св-18ХГСА	0,79	0,80	0,81	0,94
Проволокой Св-10ГС	0,71	0,55	0,37	-
Сварка в смеси (Аг+5%о2):				
Проволокой Св-18ХГСА	0,60	0,69	0,71	0,92
Проволокой Св-10ГС	0,59	0,41	0,32	-
Сварка электродами УОНИ-13/45	-	0,45-0,55	0,14-0,27	-

9. Устанавливается химический состав шва (содержание отдельных элементов) при отсутствии испарения. коэффициенты $\eta_0, \eta_{\text{Э}}$ принимаются равными 1 в формуле (1).

$$[\text{Э}] = \gamma_{\text{Э}} \cdot [\text{Э}]_0 + (1 - \gamma_{\text{Э}}) \cdot [\text{Э}]_{\text{Э}} \quad (2)$$

10. Определяется количество отдельных ингредиентов в составе СА (разность между значениями, полученными по выражению (1) и (2)), с учетом поправочных коэффициентов по позициям 4,5,6, делают условия труда более тяжелыми для сварщика.

11. Разрабатываются средства охраны труда и техники безопасности.

Коэффициенты перехода элементов можно определить расчетом или графически [6,7].

Предложенную методику использовали при оценке СА образующегося при сварке стыкового соединения на крыше вагона электропоезда из стали 10Х13Г18Д толщиной 1,5мм электродом диаметром 2мм типа ЭА-1Б марки ЦЛ-11 в нижнем положении. Положение сварщика на корточках. Условия сварки –крыша вагона - открытая площадка. Результаты прогноза: содержание Mn = 0,32 мг/м³, Cr = 0,38 мг/м³, Si = 0,02 мг/м³, Ti = 0,019 мг/м³. Содержание марганца и хрома превышает ПДК [8]. Поэтому нужно уделить внимание проектированию местной передвижной вентиляции [9].

Выводы.

1. Разработана методика прогнозирования состава СА при сварке крупногабаритных конструкций с учетом коэффициентов перехода отдельных элементов для выбранного способа сварки.

2. При оценке вредности определенного элемента учитываются условия сварки, положение шва, рабочая поза сварщика. Неудобная поза, сварка внутри конструкции,

выполнение потолочного шва факторы усугубляющие действие вредных элементов (Mn, Cr, Si) оцениваются поправочными коэффициентами.

3. Прогнозирование интенсивности выделения СА дает возможность правильно проектировать местную вытяжную вентиляцию.

Л и т е р а т у р а

1. Гринберг А.В., Буданова Л.Ф. Пневмокониозы // Справочник профпатолога. Л.: Медицина, 1977. С. 255-287.
2. Измеров Н.Ф., Монашенкова А.М., Артамонова В.Г. и др. Профессиональные болезни // Руководство для врачей: В 2 т. Т.1. М., 1996. С. 23-38.
3. Parkes W.R. Pneumoconiosis associated with coal and other carbonaceous materials // Parkes W.R., ed. Occupational Lung Disorders. 3rd ed. L.: Butterworths, 1994. P. 366-368.
4. Guidelines for the use of the ILO international classification of the radiographs of pneumoconioses. Revised edition 2000. Intern. Lab. Office. Geneva. P. 43.
5. Левченко О. Г. Математическое моделирование химического состава и уровня выделения сварочного аэрозоля // Свароч. пр-во. - 2001.- № 7. - С. 25-28.
6. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко и среднелегированных сталей. Киев, наукова думка, 1978г, 272 с.
7. Буки А.А. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. М.: Машиностроение, 1991 г., 288 с.
8. Брауде М.З. Охрана труда при сварке в машиностроении. М.,» Машиностроение», 1978.- 144с.
9. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Левченко О. Г. Пути решения экологических проблем сварочного производства // Сварочные чтения. Теория и практика: Материалы ежегодной научно-технической конференции сварщиков / Институт сварки России. – СПб.: Издательство «Вит-принт», 2003. – С. 8-16.

R e f e r e n c e s

1. Grinberg A.V., Budanova L.F. Pnevmoniozy // Spravochnik profpatologa. L.: Medicina, 1977. S. 255-287.
2. Izmerov N.F., Monashenkova A.M., Artamonova V.G. i dr. Professional'nye bolezni // Rukovodstvo dlja vrachej: V 2 t. T.1. M., 1996. S. 23-38.
3. Parkes W.R. Pneumoconiosis associated with coal and other carbonaceous materials // Parkes W.R., ed. Occupational Lung Disorders. 3rd ed. L.: Butterworths, 1994. P. 366-368.
4. Guidelines for the use of the ILO international classification of the radiographs of pneumoconioses. Revised edition 2000. Intern. Lab. Office. Geneva. P. 43.
5. Levchenko O. G. Matematicheskoe modelirovanie himicheskogo sostava i urovnja vydele-nija svarochnogo ajerozolja // Svaroch. pr-vo. - 2001.- № 7. - S. 25-28.
6. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko i srednelegirovannyh sta-lej. Kiev, naukova dumka, 1978g, 272 s.
7. Buki A.A. M odelirovanie fiziko-himicheskikh processov dugovoj svarki. M.: Mashino-stroenie, 1991 g., 288 s.
8. Braude M.Z. Ohrana truda pri svarke v mashinostroenii. M.,» Mashinostroenie», 1978.-144s.
9. Paton B. E., Lobanov L. M., Levchenko O. G. Puti reshenija jekologicheskikh problem svarochnogo proizvodstva // Svarochnye chtenija. Teorija i praktika: Materialy ezhegodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii svarshikov / Institut svarki Rossii. – SPb.: Izdatel'stvo «ViT-print», 2003. – S. 8-16.

Gedrovich D.A., Gedrovich A.I.

Forecasting the composition of welding aerosol in the welding of flat steels

The article describes a method of forecasting the composition of welding torches for semi-automatic welding of steels of a structural class in the process of making large-size structures. Sources .9.

Key words: welding, steel, harmful and safe factors, wagon, forecast, measures safety.

Гедрович Д.А., Гедрович А.И.

Прогнозування складу зварювального аерозолу при зварюванні однорідних сталей

В статті описана методика прогнозування складу зварювального факелу при напівавтоматичному зварюванні сталей одного структурного класу в процесі виготовлення великогабаритних конструкцій. Ист.9.

Ключові слова: зварювання, сталі, шкідливі та безпечні фактори, вагон, прогноз, міри безпеки.

Гедрович Денис Анатолійович – аспірант кафедри охорони праці та БЖД Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ);

Гедрович Анатолій Іванович – професор кафедри ОМТ та зварювання Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Гутько Ю.И., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

УДК 666.974

М. В. Драпалюк

г. Луганск

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ И УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ

В статье приведено теоретическое обоснование влияния структурно-механической неоднородности бетона на его прочность. Определены пути оптимизации структуры бетона с целью повышения трещиностойкости, ударной стойкости и долговечности. Показано, что использование бетонов на смешанных крупных и мелких заполнителях, а также комбинированных бетонов, в качестве вяжущих в которых используются портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, пуццолановый и другие виды смешанных цементов позволяет максимально снизить дефектность бетона.

Ключевые слова: структурно-механическая неоднородность бетона, оптимизация структуры, дефектность, цементная матрица, кристаллы.

В настоящее время считается общепризнанным определяющее влияние структуры бетона на его физико-механические свойства. Особенностью структуры бетона является ее высокая неоднородность, определяемая тремя факторами: пористостью цементной матрицы, значительным различием составляющих бетона по упругим и прочностным характеристикам, дефектностью структуры бетона на всех ее уровнях [1].

В зависимости от размеров в цементной матрице бетона выделяют три группы пор: поры геля, капиллярные поры и макропоры. Поры геля имеют диаметр $(15...30) \cdot 10^{-7}$ м и составляют (по Пауэрсу) около 28% объема матрицы.

Капиллярная пористость характеризуется диаметром пор $10^{-7}...10^{-5}$ м, количество которых в цементной матрице составляет 10...40%. Меньшее значение пористости соответствует цементной матрице бетона нормального твердения в возрасте 28 сут при В/Ц около 0,2, большее значение - при В/Ц около 0,8. В этом интервале В/Ц прочность при сжатии цементной матрицы бетона изменяется в пределах одного порядка: приблизительно от 100 до 15 МПа [2].

Макропоры в цементной матрице - это поры с размерами до 10^{-3} м. Несмотря на незначительное содержание в цементной матрице и бетоне макропор (до нескольких процентов).

Таким образом, цементная матрица - носитель прочности бетона - содержит поры различных размеров, которые существенно снижают прочностные свойства бетона [2].

Значительное различие цементной матрицы и заполнителей бетона по прочностным и упругим характеристикам определяется тем обстоятельством, что плотные заполнители тяжелого бетона, в т.ч. кварцевый песок, не обладают идеальной совместимостью с традиционной цементной матрицей, имеющей модуль упругости $(8...20) \cdot 10^3$ МПа, в силу своей высокой жесткости (модуль упругости до 10^5 МПа), приводящей к значительным усадочным напряжениям при твердении [3].

Дефектность структуры бетона складывается из дефектности цементной матрицы, определяемой размерностью кристаллов и контактов в кристаллогидратном сростке,

микротрещинами термомеханической и усадочной природы, а также несовершенством контактного слоя между цементной матрицей и заполнителем.

Кристаллогидратный сросток представляет собой хаотически ориентированную, много раз статически неопределимую структуру, состоящую из неравнопрочных и разноразмерных кристаллов, сростшихся в местах контактов, в которой уже на стадии гидратационного структурообразования возможны деструктивные процессы, обусловленные усадочными напряжениями. Это подтверждают случаи саморазрушения образцов на напрягающих цементах. Возникающие внутренние напряжения снижают предельную растяжимость цементной матрицы бетона и приводят к образованию трещин при меньших уровнях и меньшем количестве циклов попеременного нагружения бетона.

Слабость контактного слоя определяется седиментационными процессами в свежесделанном бетоне и развитием в нем усадочных трещин при твердении. Сначала в результате внутреннего водоотделения вода скапливается под зернами заполнителя, в результате чего образуются пустоты, частично или полностью заполненные водой. В процессе твердения бетона дефектность контактного слоя усиливается за счет возникновения усадочных напряжений и, как следствие этого, образования и развития трещин усадочной природы, локализованных, в основном, на границах раздела фаз с различными жесткостями [4].

Цель исследований заключается в определении возможности описания механизма разрушения и оценки прочности кристаллизационного сростка применительно к структуре модифицированной цементной матрицы бетона.

Я.И. Френкель [5] при исследовании механизма разрушения кристаллических тел отмечал, что развитие и рост трещин могут эффективно тормозиться присутствующими в материале мелкими порами, а также включениями с меньшей прочностью или модулем упругости. Следовательно, кроме зон с пониженной прочностью, эффективным тормозом на пути растущей трещины могут стать зоны с повышенной вязкостью, имеющие модуль упругости значительно меньше модуля упругости основного материала. Кроме высоких вязко-пластических свойств, указанные зоны должны обладать также высокой адгезией к основному материалу.

Впервые теоретическое обоснование принципа «слабой поверхности» (впоследствии названного «демпфирующим элементом») применительно к бетону дано П.Г. Комоховым [6]. Механизм торможения процессов разрушения бетона определяется присутствием в нем «слабых» упруго-вязких и слоистых включений, снижающих локальные напряжения и гасящих энергию роста трещин. К подобным слоистым включениям относятся гидросиликаты и гидроксид кальция, а также добавки полимеров и вспученного вермикулита, названные «демпфирующими». Кроме того, вязкими катализаторами хрупкого разрушения бетона являются замкнутые воздушные поры, которые, с одной стороны, снижают эффективное сечение материала, с другой - способны перераспределить локальные напряжения в бетоне среди его компонентов с различной упругостью.

Отличительными признаками демпфирующих добавок являются их пониженные жесткостные характеристики, определяемые высокой пористостью материала. Введение в бетон таких добавок, снижающих концентрацию напряжений на границе раздела фаз с различными упругими характеристиками, существенно уменьшает размах колебаний и пределы изменений максимальной и минимальной деформации и напряжений в процессе разрушения бетона.

По П.Г. Комохову [6], механизм действия демпфирующих добавок состоит в том, что на пути растущей трещины возникает энергетический гаситель в виде микровключения. Такое включение не способно отдавать полученную энергию, затраченную на его деформирование. Тем самым уменьшается энергия роста трещины и релаксируют напряжения в ее вершине. Наличие в структуре бетона упруго-вязких включений - низко-модульных добавок демпфирующего действия как релаксаторов внутренних напряжений и энергетических гасителей трещин - обеспечивает повышение прочности, трещиностойкости и морозостойкости бетона.

Последовательность разрушения кристаллогидратного сростка как отдельной микроячейки цементной матрицы при действии динамических нагрузок представляется следующей:

- в первом цикле нагружения происходит разрушение наиболее малопрочных элементов кристаллизационного сростка (наиболее крупных и малопрочных кристаллов, а нагрузка, которую несли разрушившиеся элементы, перераспределяется на наиболее прочные сохранившиеся;

- при последующих циклах нагружения происходит постепенный выход из строя более прочных элементов из числа сохранившихся в каждом предшествующем цикле. Причем, частичные разрушения микроячеек будут иметь место в каждом цикле нагружения, поскольку на более прочные сохранившиеся элементы будет действовать и большая величина нагрузки;

- полное разрушение микроячейки при некотором критическом числе циклов нагружения, т.е. выход из строя всех, в том числе наиболее прочных ее элементов, способных нести нагрузку. Следует отметить, что при этом не происходит окончательного разрушения материала в целом, так как отдельные микроячейки также различаются по прочности.

Интегральное накопление повреждений как отдельных микроячеек цементной матрицы со стабилизацией разрушения и перераспределением усилий на оставшиеся ячейки имеет место лишь до определенного момента, после которого наступает полное разрушение материала.

Таким образом, повышение общей прочности кристаллогидратного сростка и длительности этапа его предразрушения в процессе многократного нагружения возможно двумя путями:

- обеспечением формирования на этапе твердения структуры с развитыми прочными контактами и повышенной дисперсностью кристаллов, что технологически осуществимо путем оптимизации режима твердения бетона и изделий на его основе;

- снижением самой величины внутреннего давления и соответственно - внутренних напряжений в структуре материала. Этому может способствовать введение в структуру цементной матрицы и бетона маложестких компонентов демпфирующего действия.

Характерно, что для бетонов с высоким насыщением маложесткими компонентами прочность контактной зоны довольно велика, а начальные дефекты контактной зоны практически отсутствуют. Поэтому по мнению [7] основную роль в процессе разрушения такого бетона играют начальные трещины в песчано-цементной матрице и в крупном заполнителе. Дальнейшее развитие начальных трещин будет проходить по-разному. Как известно, трещины имеют тенденцию легко проникать из более жесткого материала в менее жесткий, а обратное явление затруднено. Поэтому трещины, развивающиеся в менее жестком материале, будут остановлены на границе с матрицей и не сыграют решающей роли в разрушении бетона. Наоборот, трещины, развивающиеся в более жесткой матрице, будут сравнительно легко проникать в заполнитель, т.е. они будут играть основную роль в разрушении бетона. Отсюда, если жесткость (модуль упругости) включения будет больше или равна жесткости цементной матрицы, то начальные трещины будут развиваться по цементной матрице, поскольку включение в этом случае воспринимает часть внешней нагрузки. В случае, когда модуль упругости включения будет меньше, чем у цементной матрицы, рост трещин будет происходить в направлении слаборазрушаемой области, т.е. в направлении маложесткого включения. И чем «слабее» включение, тем интенсивнее протекает этот процесс.

В попытках теоретического подхода к описанию механизма демпфирования хрупких пористых материалов (типа цементного камня и бетона) чрезвычайно трудно учесть влияние всей гаммы структурных факторов. Такими факторами являются: наличие или отсутствие в твердой непоризованной фазе пористого материала начальных остроконечных дефектов типа трещин (будем в последующем в этом смысле различать дефектный и бездефектный по твердой фазе пористые материалы), интегральная пористость, функция распределения пор по размерам, абсолютный размер пор по отношению к размеру трещин и объемное насыщение таких трещин, степень неупорядоченности распределения пор в объеме, а также анизотричность пор.

В связи с этим целесообразен ступенчатый, поэтапный подход к решению задачи о возможности торможения и гашения роста трещин в бетоне. Ее можно разложить на следующие частные задачи:

- о торможении трещин (демпфировании) и связанном с ним изменении прочности бездефектного пористого материала с малой пористостью - бетона (при отсутствии взаимного влияния пор);

- о демпфировании и изменении прочности бездефектного пористого материала с высоким уровнем пористости при регулярном и неупорядоченном расположении одномерных и разноразмерных пор;

- о демпфировании и изменении прочности дефектного пористого материала с малой и большой пористостью при малом и большом (по отношению к дефектам) размере пор;

- о демпфировании и изменении прочности дефектного пористого материала с большой пористостью при наличии пор широкого по размерам спектра при неупорядоченном расположении пор.

Перечень задач составлен таким образом, что каждая последующая осложняется по отношению к предыдущей на один структурный фактор, влияние которого сравнительно несложно наложить на предыдущий результат.

Поэтапная схема позволяет обойти распространенный вероятностный подход к решению задачи и осуществить детерминистический подход к описанию механизма демпфирования и разрушения, учитывающий локальные разрушения в отдельных микрообъемах материала, предшествующие окончательному разрушению образца.

Подытожить сказанное можно словами А.А. Гвоздева [8], который отметил, что «неоднородность бетона, порождая возникновение микротрещин, задерживает их перерождение в опасные макротрещины, а наличие концентраторов напряжений в самой структуре материала делает его малочувствительным как к внешним концентраторам, так и ко вновь возникшим внутренним».

Суммируя известные результаты исследований связи структуры и прочности бетона, можно определить следующие пути оптимизации его структуры с целью повышения трещиностойкости, ударной стойкости и долговечности.

1. Снижение жесткости заполнителей бетона за счет использования плотных заполнителей средней жесткости (типа известнякового щебня) и легких заполнителей (шлаковой пемзы, керамзита). Однако указанные бетоны могут иметь пониженную по сравнению с тяжелыми бетонами на плотных и прочных заполнителях прочность при сжатии.

2. Снижение концентрации плотных заполнителей за счет раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором и мелкого – цементным камнем.

3. Повышение прочности сцепления заполнителя с цементным камнем за счет повышения чистоты и шероховатости поверхности плотных заполнителей, а также применения пористых заполнителей.

4. Использование бетонов на смешанных крупных и мелких заполнителях, а также комбинированных бетонов, в качестве вяжущих в которых используются портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, пуццолановый и другие виды смешанных цементов.

Наиболее оптимально последнее предложение, являющееся фактически комбинацией первых трех приемов. Его реализация позволяет одновременно устранить отмеченные недостатки и максимально снизить дефектность бетона.

Л и т е р а т у р а

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. / Ахвердов И.Н. - М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Гусев Б.В. Вибрационная технология бетона /Б.В. Гусев, В.Г. Зазимко. – К: Будівельник, 1991. – 163 с.
3. Соломатов В.И. Интенсивная технология бетонов / Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.

4. Derucher K.M. Composite materials: Testing and Design. / Derucher K.M. – New Orleans - Philadelphia, 1989. - 697 p.
5. Френкель Я.И. Статическая физика. / Френкель Я.И. – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1968. – 760 с.
6. Комохов П.Г. Технологические свойства бетонной смеси с пластификатором Л-1 / Комохов П.Г., Сычев М.М., Курашев М.И. Современная технология производства работ в строительстве. Материалы семинара. - Л. - 1983. - С. 33-37.
7. Пискунов Ю.А. Механизм разрушения бетона при ударе / Пискунов Ю.А. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1989. - № 5. – С. 68-71.
8. Гвоздев А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев // НИИЖБ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1987. - 299 с.

References

1. Ahverdov I.N. Osnovy fiziki betona. / Ahverdov I.N. - M.: Strojizdat, 1981. – 464 s.
2. Gusev B.V. Vibracionnaja tehnologija betona /B.V. Gusev, V.G. Zazimko. – K: Budivel'nik, 1991. – 163 s.
3. Solomatov V.I. Intensivnaja tehnologija betonov / Solomatov V.I., Tahirov M.K., Taher Shah Md. – M.: Strojizdat, 1989. – 264 s.
4. Derucher K.M. Composite materials: Testing and Design. / Derucher K.M. – New Orleans - Philadelphia, 1989. - 697 p.
5. Frenkel' Ja.I. Statcheskaja fizika. / Frenkel' Ja.I. – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1968. – 760 с.
6. Komohov P.G. Tehnologicheskie svojstva betonnoj smesi s plastifikatorom L-1 / Ko-mohov P.G., Sychev M.M., Kurashev M.I. Sovremennaja tehnologija proizvodstva rabot v stroitel'-stve. Materialy seminar. - L. - 1983. - S. 33-37.
7. Piskunov Ju.A. Mehanizm razrushenija betona pri udare / Piskunov Ju.A. // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. - 1989. - № 5. – S. 68-71.
8. Gvozdev A.A. Prochnost', strukturnye izmenenija i deformacii betona / A.A. Gvozdev // NIIZhB Gosstroja SSSR. - M.: Strojizdat, 1987. - 299 s.

М. В. Драпалюк

Вплив структурно-механічної неоднорідності бетону на його міцність та ударну стійкість

В статті наведено теоретичне обґрунтування впливу структурно-механічної неоднорідності бетону на його міцність. Визначено шляхи оптимізації структури бетону з метою підвищення тріщиностійкості, ударної стійкості та довговічності. Показано, що використання бетонів на змішаних великих та дрібних заповнювачах, а також комбінованих бетонів у яких використовується портландцемент із мінеральними добавками, шлакопортландцемент, пуццолановий та інші види змішаних цементів дозволяє максимально знизити дефектність бетону.

Ключові слова: структурно-механічна неоднорідність бетону, оптимізація структури, дефектність, цементна матриця, кристали.

M.V.Drapaluk

Influence of structurally-mechanical heterogeneity of concrete on its durability and shock firmness

The theoretical substantiation of influence of structurally-mechanical heterogeneity of concrete on its durability is resulted. Ways of optimization of structure of concrete for the purpose of increase fracture, shock firmness and durability are defined. It is shown that use of concrete on the mixed large and small fillers, and also the combined concrete, as knitting in which are used cement with mineral additives, and other kinds of the mixed cements allows to lower deficiency of concrete as much as possible.

Keywords: structurally-mechanical heterogeneity of concrete, structure optimization, deficiency, a cement matrix, crystals.

Драпалюк М.В. – старший преподаватель кафедры городского строительства и хозяйства Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (г. Луганск).

Рецензент: **Руденко Н.Н.**, д.т.н., проф., заведующая кафедрой городского строительства и хозяйства Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля (г. Луганск).

ЛОКАЛИЗАЦИЯ КОНТАКТА В ГЛОБОИДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ

Исследуются геометрические параметры червячной глобоидной передачи на базе прямозубого эвольвентного колеса с контактом, локализованным различными методами. Определены кривизны и контактные эллипсы взаимодействующих поверхностей зубьев. Рис. 8. Ист. 6

Определенный интерес у исследователей вызывают нетрадиционные глобоидные передачи, включающие в качестве одного из элементов пары цилиндрическое колесо с прямыми или близкими к ним зубьями [1,2]. Червяк такой передачи может быть нарезан, например, по способу [3] с использованием в качестве инструмента зуборезного долбяка. В станочном зацеплении режущая кромка инструмента описывает активную поверхность производящего колеса. Если параметры колеса червячной передачи совпадают с параметрами и станочными установками долбяка, передача характеризуется линейным контактом зубьев, который предопределяет высокую чувствительность передачи к погрешностям изготовления и сборки.

В связи с этим актуальной является задача локализации контакта в червячной глобоидной передаче для снижения ее чувствительности к погрешностям. Известен ряд приемов, позволяющих перевести линейный контакт зубьев в контакт локально-линейный или точечный [4]. Используем два метода локализации контакта. Согласно одному из них синтез сопряженного зацепления осуществляется по первому способу Оливье, состоящему в изготовлении обоих элементов зубчатой пары общей производящей поверхностью. При этом линии контакта станочных зацеплений имеют общую точку. Второй метод состоит в обработке червяка тем же инструментом, поверхность зуба парного колеса получают модификацией производящей поверхности. При этом зубья рабочего колеса находятся внутри зубьев производящего, находясь с ними в линейном контакте.

Производящая поверхность.

В качестве производящей поверхности примем поверхность зуба эвольвентного прямозубого колеса (рис.1).

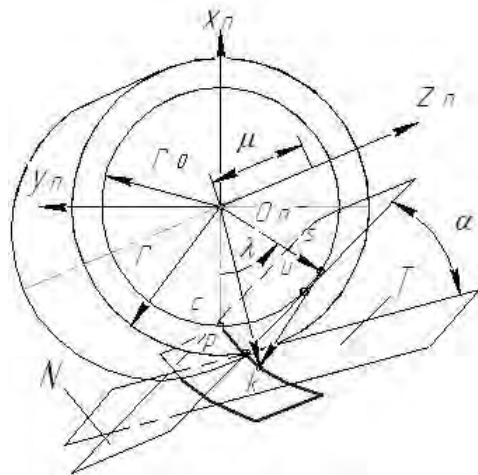


Рис. 1. Производящая поверхность и ее элементы

В системе координат x_n, y_n, z_n уравнение боковой поверхности зуба в векторном виде описывается уравнением

$$\vec{r}_n = -r_0(\cos \lambda + \lambda \sin \lambda)\vec{i}_n - r_0(\sin \lambda - \cos \lambda)\vec{j}_n + \mu\vec{k}_n, \quad (1)$$

где $r_0 = r \cos \alpha$ - радиус основной окружности колеса П; r - радиус начальной окружности; α - угол профиля исходного контура (угол зацепления); λ (угол развернутости эвольвенты), μ (расстояние по оси z_n) - параметры производящей поверхности.

Определим основные характеристики производящей поверхности.

Частные производные радиус-вектора (1) по параметрам λ , μ

$$\vec{r}_{n\lambda} = -r_0\lambda \cos \lambda \vec{i}_n - r_0\lambda \sin \lambda \vec{j}_n; \vec{r}_{n\mu} = \vec{k}_n. \quad (2)$$

Отметим, что эти векторы являются касательными к координатным линиям на поверхности (1) $\mu = const$ и $\lambda = const$, соответственно.

Уравнения нормали к производящей поверхности и модуля нормали

$$\vec{n}_n = \vec{r}_{n\lambda} \times \vec{r}_{n\mu} = -r_0\lambda \sin \lambda \vec{i}_n + r_0\lambda \cos \lambda \vec{j}_n, |\vec{n}_n| = \sqrt{n_{nx}^2 + n_{ny}^2 + n_{nz}^2} = r_0\lambda. \quad (3)$$

Единичный вектор нормали (3)

$$\vec{e}_n = \vec{n}_n / |\vec{n}_n| = -\sin \lambda \vec{i}_n + \cos \lambda \vec{j}_n. \quad (4)$$

Найдем коэффициенты первой и второй квадратичных форм и главные кривизны поверхности (1), используя зависимости [5]:

$$\begin{aligned} E_n &= \vec{r}_{n\lambda} \vec{r}_{n\lambda} = r_0^2 \lambda^2; F_n = \vec{r}_{n\lambda} \vec{r}_{n\mu} = 0; G_n = \vec{r}_{n\mu} \vec{r}_{n\mu} = 1; \\ L_n &= -\vec{r}_{n\lambda} \vec{e}_{n\lambda} = -r_0\lambda; M_n = -\vec{r}_{n\lambda} \vec{e}_{n\mu} = 0; N_n = -\vec{r}_{n\mu} \vec{e}_{n\mu} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Средняя $H_n = \frac{1}{2}(k_{1n} + k_{2n}) = \frac{EN - 2FM + GL}{EG - F^2} = -\frac{1}{2r_0\lambda}$ и полная (Гауссова) кривизны производящей поверхности

$$K_n = k_{1n}k_{2n} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} = 0. \quad (6)$$

С учетом соотношений (5) и (6) определим главные кривизны поверхности (1) (кривизны вдоль координатных линий данной поверхности)

$$k_{1n,2n} = H \pm \sqrt{H^2 - K} = -\frac{1}{2r_0\lambda} \pm \sqrt{\frac{1}{4r_0^2\lambda^2}}; k_{1n} = 0; k_{2n} = -\frac{1}{r_0\lambda}. \quad (7)$$

Локализацию контакта в глобоидной передаче изложим в приведенной выше последовательности.

1. Локализация контакта по первому способу Оливье.

Рассмотрим схемы станочных зацеплений производящего колеса П с колесами 1 и 2, а также схему рабочего зацепления колес 1 и 2. Введем в рассмотрение следующие системы координат: неподвижную $s(x, y, z)$ и три подвижных системы координат - $s_n(x_n, y_n, z_n)$, $s_1(x_1, y_1, z_1)$, $s_2(x_2, y_2, z_2)$, связанные с колесами П, 1 и 2, соответственно (рис. 2). Оси координат z и z_n совпадают, z_n и z_1 параллельны и находятся на расстоянии a_1 друг от друга в отрицательном направлении оси x .

Ось z_2 отстоит от оси z_n на расстояние a_2 и повернута относительно нее на угол γ в сторону движения часовой стрелки, если смотреть с положительного направления оси x . Таким образом, колесо П образует с колесом 1 внутреннее зацепление (то есть число зубьев колеса 1 меньше числа зубьев колеса П), с колесом 2 - наружное; боковая поверхность зуба колеса П является общей производящей поверхностью для обоих нарезаемых колес. На приведенной схеме φ_1, φ_2 - углы поворота колес 1 и 2 (колеса 1, 2, П вращаются вокруг осей z_1, z_2, z_n с угловыми скоростями $\omega_1, \omega_2, \omega_n$). Межосевое расстояние передачи, составленной из колес 1 и 2 $a = a_2 - a_1$.

Для исследования станочных зацеплений запишем уравнение (1) в неподвижной системе координат s

$$\vec{r} = -r_0(\cos \theta + \lambda \sin \theta)\vec{i} - r_0(\sin \theta - \lambda \cos \theta)\vec{j} + \mu\vec{k}, \quad (8)$$

здесь $\theta = \lambda + \varphi_n$, где φ_n - угол поворота колеса П.

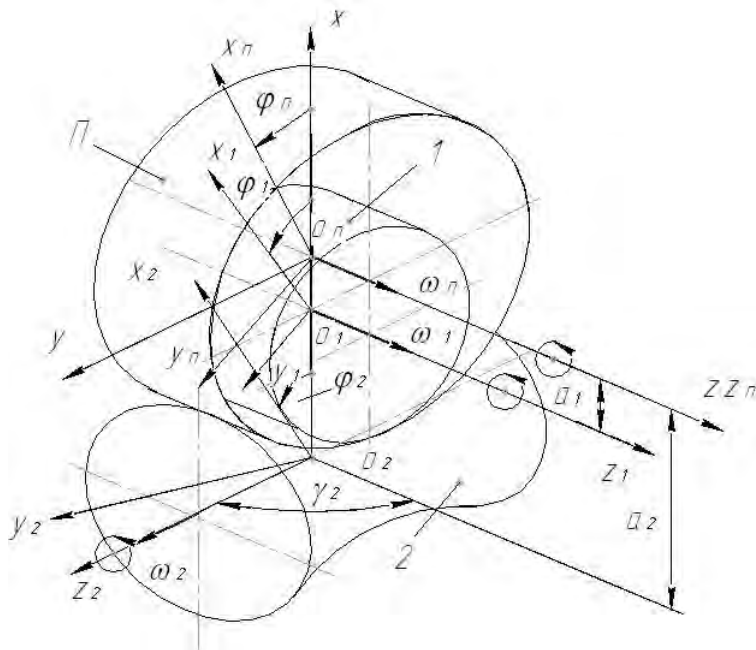


Рис. 2. Схема станочных и рабочего зацеплений

Приведем уравнение, определяющее скорость относительного движения звеньев в системе координат s_n , в общем виде [4]:

$$\begin{aligned} \vec{v}_n^{(ni)} = & [-y_n(1 - u_{in} \cos \gamma) - z_n u_{in} \sin \gamma \cos \phi_n - a_i u_{in} \cos \gamma \sin \phi_n] \vec{i}_n + \\ & + x_n [(1 - u_{in} \cos \gamma) + z_n u_{in} \sin \gamma \sin \phi_n - a_i u_{in} \cos \gamma \cos \phi_n] \vec{j}_n - \\ & - u_{in} \sin \gamma (x_n \cos \phi_n - y_n \sin \phi_n + a_i) \vec{k}_n. \end{aligned} \quad (9)$$

В приведенной зависимости $i=1,2$; u_{in} – передаточные отношения станочных зацеплений. Здесь принято, что угловая скорость колеса П $\omega_n=1$ рад/с, угловые скорости нарезаемых колес $\omega_i = \omega_n u_{in}$, для получения истинного значения относительной скорости необходимо умножить на величину ω_n правую часть выражения (9).

Определяя скорость относительного движения поверхностей П-1, положим значение $\gamma=0$, для поверхностей П-2 примем $\gamma=\pi/2$. После преобразований получим

$$\begin{aligned} \vec{v}_n^{(n1)} = & [r_0(\sin \lambda - \lambda \cos \lambda)(1 - u_{1n}) - a_1 u_{1n} \sin \phi_n] \vec{i}_n - \\ & - r_0(\cos \lambda + \lambda \sin \lambda)(1 - u_{1n}) - a_1 u_{1n} \cos \phi_n] \vec{j}_n, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_n^{(n2)} = & [r_0(\sin \lambda - \lambda \cos \lambda) - \mu u_{2n} \cos \phi_n] \vec{i}_n - [r_0(\cos \lambda + \lambda \sin \lambda) - \\ & - \mu u_{2n} \sin \phi_n] \vec{j}_n - u_{2n} [r_0(\cos \theta + \lambda \sin \theta) - a_2] \vec{k}_n. \end{aligned} \quad (11)$$

Составим уравнения станочных зацеплений

$$\vec{e}_n \vec{v}_n^{(n1)} = f_1(\lambda, \mu, \phi_n) = -r_0 - a_1 u_{1n} \cos \theta = 0, \quad (12)$$

$$\vec{e}_n \vec{v}_n^{(n2)} = f_2(\lambda, \mu, \phi_n) = -r_0 + \mu u_{2n} \sin \theta = 0. \quad (13)$$

Заметим, что уравнение зацепления поверхностей П-1 (12) не зависит от параметра μ . Это позволяет сделать вывод: указанное зацепление относится к плоским зацеплениям, то есть его можно исследовать при любом значении $\mu = const$. После преобразований уравнение (12) можно привести к виду:

$$\theta = \lambda + \phi_n = \alpha. \quad (14)$$

Решая совместно соотношения (8) и (14), получим поверхность зацепления колес 1 и П в виде плоскости N , касательной к основным цилиндрам этих колес и пересекаю-

щей плоскость T , касательную к начальному цилиндру колеса Π в точке P под углом зацепления α (эти плоскости показаны на рис. 1).

Уравнение станочного зацепления колес Π -2 (рис. 2) можно представить в виде:

$$\mu = \frac{r_0}{u_{2n} \sin(\lambda + \phi_n)}, \quad (15)$$

который дает возможность упростить численный анализ характеристик передачи, исключая один из параметров поверхности.

Поверхность зацепления колес 2 и Π получим, рассматривая совместно зависимости (8) и (13). Фиксируя значения угла поворота производящего колеса ϕ_n при учете формулы (15) и изменяя параметр λ , определим контактные линии поверхностей Π и 2 в неподвижной системе координат. Вычисления по указанным зависимостям проводились при следующих данных: модуль зацепления $m = 1 \text{ мм}$, число зубьев производящего колеса $z_n = 25$; число заходов червяка $z_2 = 1$; угол профиля исходного контура $\alpha = 20 \text{ град.}$; число зубьев колеса 1 $z_1 = 20$; диаметр червяка в среднем торцовом сечении $d_2 = 8 \text{ мм}$; межосевые расстояния – $a_1 = 2.5 \text{ мм}$, $a_2 = 16.5 \text{ мм}$.

Контактные линии поверхностей 2- Π (рис. 6) построены в цилиндрической системе координат r_n, z , где

$$r_n = \sqrt{x^2 + y^2} = r_0 \sqrt{1 + \lambda^2}, z = \frac{r_0}{u_{2n} \sin \theta}. \quad (16)$$

Характерным является то, что линии контакта поверхностей Π -2 расположены не симметрично на боковой поверхности зуба производящего колеса и не пересекают плоскость среднего торцового сечения.

Линия зацепления колеса 1 и червяка 2 найдется как линия пересечения поверхностей станочных зацеплений Π -1 и Π -2. Для определения этой линии решаем совместно уравнения (8), (12) и (13).

Используя выражение (14), установим, что линия зацепления принадлежит плоскости, касательной к основным цилиндрам 1 и Π , и плоскости

$$\mu_k = \frac{r_0}{u_{2n} \sin \alpha}. \quad (17)$$

Степень локализации контакта в передаче определяется размерами и расположением контактных эллипсов соприкасающихся поверхностей зубьев, которые зависят от сближения поверхностей и их кривизны.

Для определения кривизны взаимодействующих поверхностей и углов между их направлениями найдем приведенные кривизны поверхностей зубьев в станочных зацеплениях, используя выражение [1]

$$k_{np}^{(ni)} = \frac{E_n f_{i\mu}^2 + f_{i\lambda}^2}{f_{i\phi} E_n - \bar{v}_n^{(ni)} \bar{r}_{n\lambda} f_{i\lambda} - \bar{v}_n^{(ni)} \bar{r}_{n\mu} f_{i\mu} E_n}. \quad (18)$$

Частные производные уравнений зацепления (12) и (13)

$$f_{1\lambda} = f_{1\phi} = a_1 u_{1n} \sin \alpha, f_{1\mu} = 0. \quad (19)$$

$$f_{2\lambda} = f_{2\phi} = \mu u_{2n} \cos \theta, f_{2\mu} = u_{2n} \sin \theta. \quad (20)$$

Для поверхностей 1- Π и 2- Π приведенные кривизны определяются по формулам

$$k_{np}^{n1} = \frac{a_1 \sin \alpha}{r_0 \lambda (r_0 \lambda - a_1 \sin \alpha)}, \quad (21)$$

$$k_{np}^{n2} = \frac{r_0^2 \lambda^2 \sin^2 \theta + \mu^2 \cos^2 \theta}{-\mu^2 r_0 \lambda \cos^2 \theta + r_0^2 \lambda^2 \sin \theta [r_0 (\cos \theta + \lambda \sin \theta) - a_2]}. \quad (22)$$

Для примера приведем графики зависимости приведенной кривизны поверхностей Π -2 от параметра λ вдоль контактных линий (рис. 3). Расчет проводился по формуле (22), параметры расчета указаны выше.

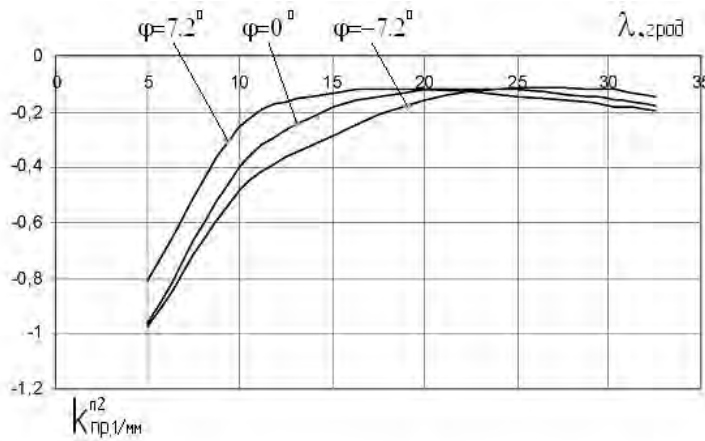


Рис. 3. Приведенная кривизна поверхностей П-2

Для измерения углов между направлениями нормальных сечений на нарезаемых поверхностях необходимо назначить начало отсчета.

Принимаем направление первой главной кривизны производящей поверхности k_{1n} (координатной линии $\lambda = const$) в качестве линии отсчета.

Запишем в системе координат s_n уравнение касательной к контактной линии

$$\vec{r}_{ni} = \vec{r}_{n\mu} f_{i\lambda} - \vec{r}_{n\lambda} f_{i\mu}. \quad (23)$$

Вектор касательной к контактной линии поверхностей П-1

$$\vec{r}_{n1} = f_{1\lambda} \vec{k}_n. \quad (24)$$

Вектор касательной к контактной линии поверхностей П-2

$$\vec{r}_{n2} = f_{2\mu} r_0 \lambda (\cos \lambda \vec{i}_n + \sin \lambda \vec{j}_n) + f_{2\lambda} \vec{k}_n. \quad (25)$$

Запишем формулу для определения угла между направлением с кривизной k_{1n} (вектором $\vec{r}_{n\mu}$) и касательной к контактной линии

$$\cos q_i = \frac{\vec{r}_{n\mu} \vec{r}_{ni}}{|\vec{r}_{n\mu}| |\vec{r}_{ni}|} \quad (26)$$

Подставляя значение $\vec{r}_{n\mu} = \vec{k}_n$ из (2), получим $\cos q_1 = 1$,

$$\cos q_2 = \frac{f_{2\lambda}}{\sqrt{f_{2\mu}^2 r_0^2 \lambda^2 + f_{2\lambda}^2}}. \quad (27)$$

При известных главных нормальных кривизнах производящей поверхности и величине угла между первым главным направлением кривизны этой поверхности и касательной к линии контакта по формуле Эйлера могут быть определены кривизны нарезаемой поверхности в нормальном сечении вдоль контактной линии и в нормальном сечении, перпендикулярном контактной линии:

$$\begin{aligned} k_{ti} &= k_{1n} \cos^2 q_i + k_{2n} \sin^2 q_i, \\ k_{ei} &= k_{1n} \sin^2 q_i + k_{2n} \cos^2 q_i - k_{np}^{mi}. \end{aligned} \quad (28)$$

Эти же кривизны могут быть выражены через главные кривизны нарезаемой поверхности и угол σ_i между первыми главными направлениями с кривизнами k_{1n} и k_{i1} (чтобы отличать от формул (28) отметим их значком *):

$$\begin{aligned} k_{ti}^* &= k_{i1} \cos^2 (q_i - \sigma_i) + k_{2i} \sin^2 (q_i - \sigma_i), \\ k_{ei}^* &= k_{i1} \sin^2 (q_i - \sigma_i) + k_{2i} \cos^2 (q_i - \sigma_i). \end{aligned} \quad (29)$$

Условие касания индикатрис Дюпена соприкасающихся поверхностей в направлении линии контакта сводится к равенству кривизн $k_{\tau i} = k_{\tau i}^*$ и равенству производных $\frac{dk_{\tau i}}{dq_i} = \frac{dk_{\tau i}^*}{d\sigma_i}$ [6], то есть

$$\begin{aligned} k_{1n} \cos^2 q_i + k_{2n} \sin^2 q_i &= k_{1i} \cos^2 (q_i - \sigma_i) + k_{2i} \sin^2 (q_i - \sigma_i), \\ (k_{1n} - k_{2n}) \sin 2q_i &= (k_{1i} - k_{2i}) \sin 2(q_i - \sigma_i). \end{aligned} \quad (30)$$

Решая совместно соотношения (30) и (29), после преобразований получим

$$\operatorname{tg} 2(q_i - \sigma_i) = \sin 2q_i \frac{k_{2n} - k_{1n}}{k_{ei} - k_{\tau i}}, \quad (31)$$

$$k_{1i} = \frac{k_{\tau i} \cos^2 (q_i - \sigma_i) - k_{ei} \sin^2 (q_i - \sigma_i)}{\cos 2(q_i - \sigma_i)}, \quad (32)$$

$$k_{2i} = \frac{k_{ei} \cos^2 (q_i - \sigma_i) - k_{\tau i} \sin^2 (q_i - \sigma_i)}{\cos 2(q_i - \sigma_i)}.$$

Для поверхности зуба колеса 1 из формул (30), (29), (31) и (32) имеем $\sigma_1 = 0$, $k_{\tau 1} = 0$, $k_{e1} = k_{2n} - k_{np}^{n1}$, $k_{11} = 0$,

$$k_{21} = k_{e1} = k_{2n} - k_{np}^{n1} = \frac{1}{r_0 \lambda - a_1 \sin \alpha}. \quad (33)$$

На рис. 4 показаны главные кривизны поверхности витка червяка 2 вдоль линии зацепления, рассчитанные по формулам (31), (32) по ранее приведенным параметрам зацеплений.

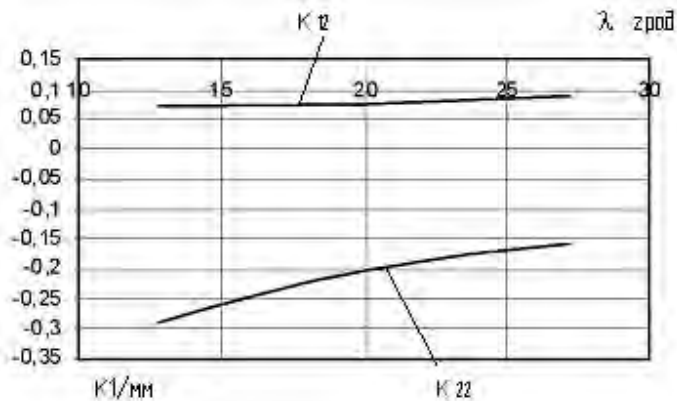


Рис. 4. Главные нормальные кривизны червяка

Определим относительное расположение контактных эллипсов, руководствуясь следующим положением. Пусть нормальное сечение поверхности 1 образует с первым главным направлением этой же поверхности угол ψ . Нормальная кривизна в данном сечении может быть найдена по формуле: $k_{\psi 1} = H_1 + \sqrt{H_1^2 - K_1} \cos 2\psi$. Вводя обозначения, $g_i = k_{1i} - k_{2i}$, $k_{\Sigma i} = k_{1i} + k_{2i}$, преобразуем выражение к виду $k_{\psi 1} = 0.5(k_{\Sigma 1} + g_1 \cos \psi)$. По такой же зависимости может быть определена нормальная кривизна поверхности червяка 2, соприкасающейся с первой в точке, принадлежащей указанному сечению: $k_{\psi 2} = 0.5[k_{\Sigma 2} + g_2 \cos 2(\psi - \sigma)]$.

В этой формуле $\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ - угол между направлениями на поверхностях контакта с кривизнами k_{11} и k_{12} .

Запишем зависимость для определения приведенной кривизны поверхностей, касающихся в точке в общем нормальном сечении, в виде

$$k_{np}^{\psi} = 0.5[k_{\Sigma 1} + g_1 \cos 2\psi - k_{\Sigma 2} - g_2 \cos 2(\psi - \sigma)] \quad (34)$$

Экстремальное значение приведенной кривизны (34) соответствует углам ψ между первым главным направлением на поверхности зуба колеса 1 и направлениями полуосей контактного эллипса.

Приравняв производную $\frac{dk_{np}^{\psi}}{d\psi}$ нулю, определим значения этих углов. После преобразований формула для вычисления угла ψ между направлением с кривизной k_{11} и большей полуосью эллиптической площадки контакта имеет вид

$$\operatorname{tg} 2\psi = \frac{g_2 \sin 2\sigma}{g_2 \cos 2\sigma - g_1}. \quad (35)$$

Приведенная кривизна поверхностей зубьев колес передачи с локализованным контактом (рис. 5) в направлении полуосей мгновенной площадки контакта, рассчитанная по выражению (33), определялась при значениях ψ из выражения (34) и $\psi + \pi/2$.

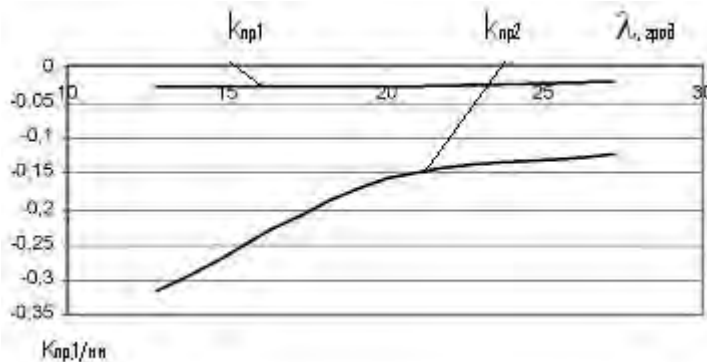


Рис. 5. Приведенная кривизна в рабочем зацеплении

Вычисления проводились для точек, расположенных на линии контакта.

Для определения размеров эллиптической площадки контакта используем зависимости [4], позволяющие вычислить размеры полуосей:

$$a, b = \sqrt{\delta / |A, B|}, \quad (36)$$

где δ - сближение поверхностей зубьев при сжатии; коэффициенты

$$A, B = 1/4(k_{\Sigma 1} - k_{\Sigma 2} \pm \sqrt{g_1^2 - 2g_1g_2 + g_2^2}). \quad (37)$$

На рис. 6 показаны контактные эллипсы локализованного первого метода контакта в передаче на линии зацепления при деформации (сближении) зубьев $\delta = 0,0075$ мм.

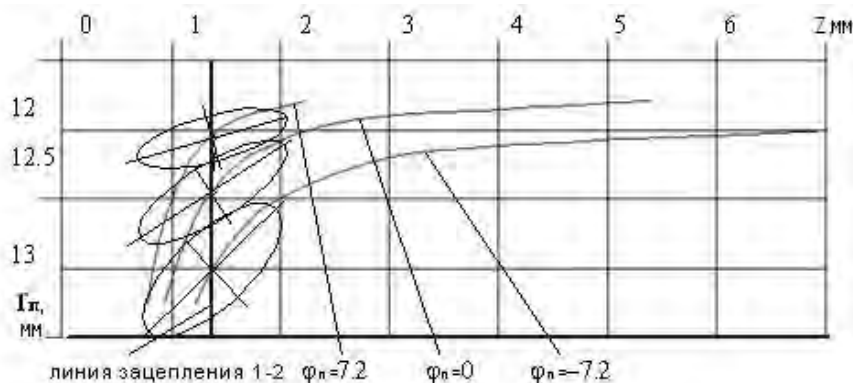


Рис. 6. Контактные эллипсы локализованного зацепления I

2. Локализация контакта методом получения поверхности рабочего колеса за счет модификации производящей поверхности.

Межосевое расстояние рабочего зацепления $a = a_2$. Торцовый профиль зуба колеса 1 – кривая, касающаяся вогнутой стороны эвольвентного профиля зуба инструмента. В качестве такой кривой для примера принята дуга окружности (рис. 7). Касание профилей происходит в точке k пересечения эвольвенты с начальной окружностью производящего колеса. Угол развернутости эвольвенты λ_0 , соответствующий точке контакта, определим из первого выражения (16) при значении $r_n = r$: $\lambda_0 = tg\alpha$. Уравнение дуги окружности в системе координат x_p, o_p, y_p запишем в виде

$$\vec{r}_p = \rho(-\sin \varepsilon \vec{i}_p + \cos \varepsilon \vec{j}_p) \quad (38)$$

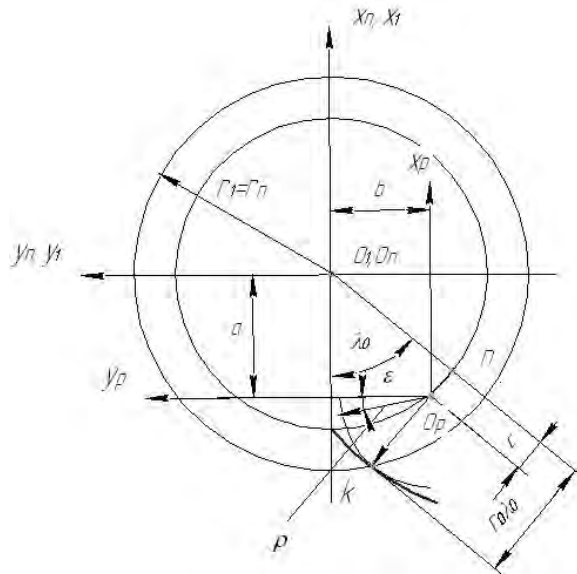


Рис. 7. Образование поверхности колеса 1

Переходя к системе координат s_1 , получим уравнение зуба колеса 1:

$$\vec{r}_1 = (a - \rho \sin \varepsilon) \vec{i}_1 + (b + \rho \cos \varepsilon) \vec{j}_1 + \mu \vec{k}_1, \quad (39)$$

где ε, μ – параметры поверхности зуба колеса 1; ρ – радиус торцового профиля, определяемый зависимостью $\rho = r_0 \lambda_0 - c$; $b = -r_0 \sin \lambda_0 + c \cos \lambda_0$, $a = -r_0 \cos \lambda_0 - c \sin \lambda_0$. Координаты точки контакта k в системе координат s_p :

$$x_p^k = -\rho \sin \lambda_0, \quad y_p^k = \rho \cos \lambda_0. \quad (40)$$

Схема зацепления (рис 2) для второго метода локализации контакта видоизменяется – оси z_1 и z_n совпадают, углы поворота колес $\phi_1 = \phi_n$.

Найдем частные производные уравнения (38) по параметрам ε, μ :

$$r_{1\varepsilon} = -\rho(\cos \varepsilon \vec{i}_1 + \sin \varepsilon \vec{j}_1), \quad r_{1\mu} = \vec{k}_1. \quad (41)$$

Вектор нормали поверхности (39)

$$\vec{n}_1 = -\rho(\sin \varepsilon \vec{i}_1 - \cos \varepsilon \vec{j}_1). \quad (42)$$

Модуль вектора (41) $|\vec{n}_1| = \rho$. Орт этого вектора $\vec{e}_1 = -\sin \varepsilon \vec{i}_1 + \cos \varepsilon \vec{j}_1$. Отметим, что при $\varepsilon = \lambda_0$ единичные векторы нормалей поверхностей (1) и (39) совпадают. Коэффициенты квадратичных форм и кривизна поверхности (39) (см. (5,6,7)) $E_1 = \rho^2$, $F_1 = 0$, $G_1 = 0$, $L_1 = -\rho$, $M_1 = 0$, $N_1 = 0$, $k_{11} = 0$, $k_{21} = -1/\rho$.

Определим единичные векторы касательных к координатным линиям $\mu = const$ поверхностей (1) и (39). Поскольку из выражений (41) следует, что $|\vec{t}_{1\mu}| = |\vec{r}_{1\varepsilon}| = \rho$, орт касательной имеет вид $\vec{t}_{1\varepsilon} = -\cos \varepsilon \vec{i}_1 - \sin \varepsilon \vec{j}_1$. Из выражений (2) единичный вектор касательной к указанной координатной линии поверхности (1) равен $\vec{t}_{n\lambda} = -\cos \lambda \vec{i}_n - \sin \lambda \vec{j}_{nm}$. Очевидно, что при $\varepsilon = \lambda_0$ орты касательных совпадают. Касательные к линиям $\lambda = const$ также равны: $\vec{t}_1 = \vec{t}_n = \vec{k}_n$. Из последних рассуждений можно сделать заключение: если две поверхности имеют в данной точке общие нормаль и касательную плоскость, значит, они касаются в этой точке.

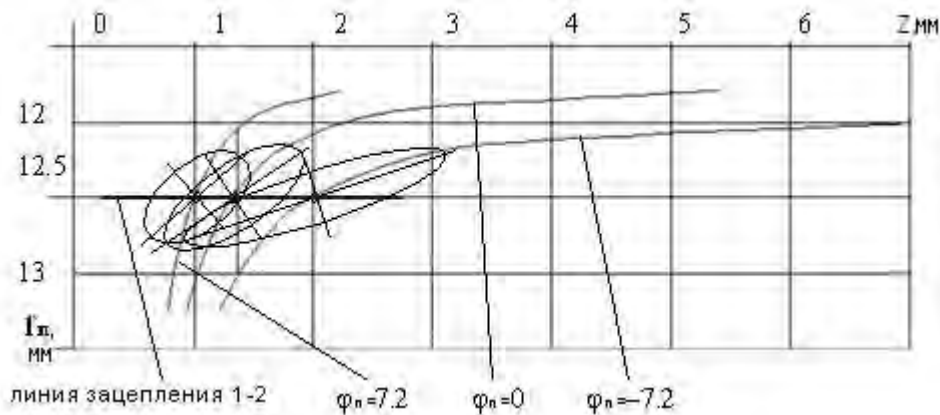


Рис. 8. Контактные эллипсы локализованного зацепления 2

Запишем уравнение (39) в системе координат s . Полагая $\varepsilon = \lambda_0$, $\theta_0 = \lambda_0 + \phi_n$, после преобразований получаем:

$$\vec{r}_{(1)} = -r_0 (\cos \theta_0 + \lambda_0 \sin \theta_0) \vec{i} - r_0 (\sin \theta_0 - \lambda_0 \cos \theta_0) \vec{j}. \quad (43)$$

Решая уравнение (43) совместно с выражениями (8) и (13), найдем линию зацепления колес 1 и 2 – прямую $\lambda = \lambda_0 = const$ (рис. 8).

В заключение приведем размеры и расположение контактных эллипсов для второго метода локализации контакта. Расчет проводился при указанных выше параметрах, значение c принято равным 1мм, $\lambda_0 = tg 20^\circ$, $z_1 = 25$ (рис. 8).

Выводы

Показана возможность локализации контакта в червячной глобоидной передаче на базе эвольвентного прямозубого колеса двумя методами: по первому способу Оливье путем уменьшения числа зубьев рабочего колеса по сравнению с числом зубьев инструмента; модификацией производящей поверхности для получения поверхности рабочего колеса путем уменьшения радиуса кривизны. С уменьшением числа зубьев (или радиуса кривизны) увеличивается степень локализации контакта. Приведена методика исследования параметров станочных зацеплений и характеристик локализованного контакта, применимая и в других подобных исследованиях.

Литература

1. Шишов В.П., Носко П.Л., Філь П.В. Теоретичні основи синтезу передач зацепленням: Монографія.-Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006.-408 с.
2. Исида, Уеда, Охашаи, Фукуи. Теоретическое и экспериментальное исследование глобоидной передачи нового типа с прямозубыми зубьями и огибающим червяком //Констр. и технология машиностроения. Тр. американского общ. инж.-М.:Мир.-1978.-Т.100.-№3.-С. 39-49.

3. Каплун А.М., Шишов В.П., Толмачев Ю.А. Способ нарезания глобoidных червяков. А. с. 806302 (СССР). Оpubл. в Б. И. №7, 1981.
4. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
5. Норден А.П. Краткий курс дифференциальной геометрии. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит. – 1958. – 244 с.
6. Дусев И.И., Васильев В.М. Аналитическая теория пространственных зацеплений и ее применение к исследованию гипoidных передач. Ростовское-на-Дону книжн. изд.-во. – 1968. – 148с.

References

1. Shishov V.P., Nosko P.L., Fil' P.V. Teoretichni osnovi sintezu peredach zacheplennjam: Monografija.-Lugans'k: Vid-vo SNU im. V. Dalja, 2006.-408 s.
2. Isida, Ueda, Ohashi, Fukui. Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie globo-idnoj peredachi novogo tipa s prjamobochnymi zub'jami i ogibajuwim chervjakom //Konstr. i tehno-logija mashinostroenija. Tr. amerikanskogo obw. inzh.-M.:Mir.-1978.-T.100.-№3.-S. 39-49.
3. Kaplun A.M., Shishov V.P., Tolmachev Ju.A. Sposob narezanija globoidnyh chervjakov. A. s. 806302 (SSSR). Opubl. v B. I. №7, 1981.
4. Litvin F.L. Teorija zubchatyh zaceplenij. – М.: Nauka, 1968. – 584 s.
5. Norden A.P. Kratkij kurs differencial'noj geometrii.- М.: Gos. izd. fiz.-mat. lit. -1958.- 244 s.
6. Dusev I.I., Vasil'ev V.M. Analiticheskaja teorija prostranstvennyh zaceplenij i ee primenenie k issledovaniju gipoidnyh peredach. Rostovskoe-na-Donu knizhn. izd.-vo. – 1968.- 148s.

О.М. Каплун, В.П. Шишов

Локалізація контакту у глобoidній передачі

Досліджуються геометричні параметри черв'ячної глобoidної передачі на базі прямозубого евольвентного колеса з контактом, локалізованим різними методами. Визначені кривизни та контактні еліпси взаємодіючих поверхонь зуб'їв. Рис. 8. Дж. 6

A.M. Kaplun, V.P. Shishov

Localization of contact with transfer globoid

The geometric parameters of the globoid worm gear transmission on the basis of the involute spur-wheel contact, localized by different methods, are examined. Determined by the curvature and contact ellipses of the interacting surfaces of the teeth. Fig. 8. Ref. 6.

Каплун О.М. – к.т.н., доц. каф. «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Шишов В.П. – д.т.н., проф. каф. «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Носко П.Л., д.т.н., проф., завідувач кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ВИСМУТ-СУРЬМА

Термо-э.д.с., удельное электросопротивление, концентрация и подвижность носителей были измерены в нелегированных монокристаллах твердых растворов висмута с 3, 5 и 7 ат.% сурьмы, выращенных методом Чохральского. Показано, что с увеличением содержания сурьмы в монокристаллах уменьшается термо-э.д.с., удельное электросопротивление и концентрация носителей заряда. Наибольшей подвижностью носителей заряда обладает монокристалл сплава висмута с 7 ат.% сурьмы.

Ключевые слова: монокристаллы, твердые растворы висмут-сурьма, электрофизические параметры.

Твердые растворы висмут–сурьма, обладающие особыми электрофизическими свойствами, находят широкое применение в качестве высокоэффективного термо- и магнитотермоэлектрического материала n-типа для изготовления твердотельных охлаждающих устройств, работающих при температуре ниже 200 К [1-4]. Градиентные кристаллы этих твердых растворов могут быть использованы для изготовления систем рентгеновской оптики [5-7]. Перспективным является использование монокристаллов сплавов висмут–сурьма для создания процессоров квантовых компьютеров [8]. Однако условия получения и электрофизические свойства этих монокристаллов недостаточно полно изучены, что обусловлено сложностью технологии выращивания и высокой чувствительностью свойств к совершенству структуры.

В настоящей работе представлены результаты измерения электрофизических параметров монокристаллов твердых растворов висмута с 3, 5 и 7 ат.% сурьмы, выращенных методом Чохральского.

Монокристаллы сплавов висмута с 3, 5 и 7 ат.% сурьмы выращивали методом Чохральского без подпитки расплава. Масса кристаллов составляла не более 5% массы расплава, поэтому неоднородность сурьмы вдоль слитка не превышала 0,2 ат. % (рис.1).

Вытягивание кристаллов проводили в направлении, параллельном плоскости (111) на монокристаллическую затравку твердого раствора висмута с сурьмой, которая отличалась от состава вытягиваемого монокристалла не более чем на 1 ат.% сурьмы (рис. 1). В качестве исходных материалов использовали висмут Ви-0000 и сурьму Су-0000. Висмут дополнительно подвергали капельной очистке в вакууме с последующей направленной кристаллизацией. Рост кристаллов проводили в атмосфере высокочистого аргона при избыточном давлении 20 – 30 кПа.

Скорость вытягивания кристаллов диаметром до 10 мм составляла от 0,02 до 0,05 мм/мин при частоте вращения 10 – 12 мин⁻¹. При выращивании кристаллов устанавливали оптимальный для данного состава сплавов Bi-Sb градиент температуры в твердой фазе в диапазоне от 40 до 50 К/см. Для измерения электрофизических параметров в выращенных монокристаллах твердых растворов на электроискровом станке вырезали образцы размером 1×2×7 мм³, одна из сторон которых была параллельна плоскости (111). После разрезания их травили в 50 % водном растворе HNO₃ и 30 % HCl в течение 1 – 3 мин. при комнатной температуре.

Термо-э.д.с. измеряли между медными проводниками двух медь-константановых термопар впаянных в отверстия глубиной 0,1 мм на боковой поверхности образцов. Градиент температуры около 1 К/см вдоль большей стороны образцов параллельной направлению вытягивания создавали с помощью нагревателя (рис. 2).



Рис. 1. Монокристалл твердого раствора висмута с 3 ат. % сурьмы

Удельное электросопротивление определяли двухзондовым методом в изотермических условиях. Измерение концентрации носителей заряда проводили с помощью эффекта Холла в магнитном поле с индукцией 0,25 Тл (рис. 3). Все измерения электрофизических параметров выполняли при температуре, близкой к комнатной.

Экспериментальные значения термо-э.д.с. монокристаллов твердых растворов висмута с 3, 5 и 7 ат.% Sb имели отрицательные величины, так как сплавы висмут-сурьма обладают n-типом проводимости. С учетом градиента температуры определяли дифференциальную термо- э.д.с.

По измеренным значениям удельного электросопротивления и концентрации носителей заряда рассчитывали их подвижность.

Измеренные значения удельного электросопротивления, концентрации и подвижности носителей заряда, исследованных образцов монокристаллов приведены в таблице 1.

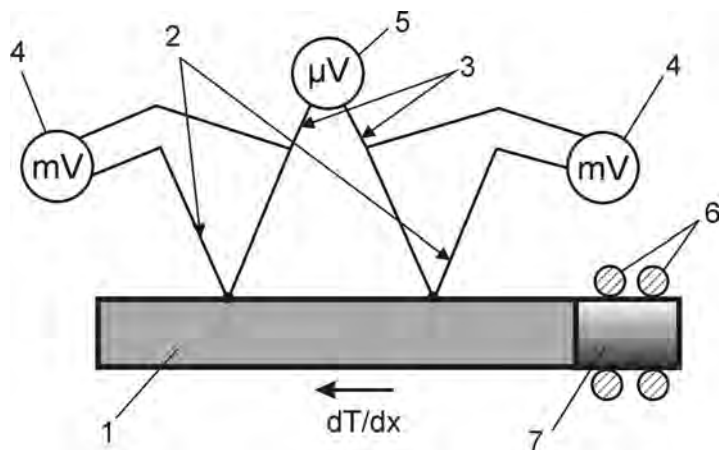


Рис. 2. Схема измерения термо-э.д.с. в образцах монокристаллов твердых растворов висмут-сурьма: 1 – измеряемый образец монокристалла; 2 – константановые проволоки термопар; 3 – медные проволоки термопар; 4 – милливольтметры для измерения температуры; 5 – микровольтметр; 6 – нагреватель; 7 – медный стержень

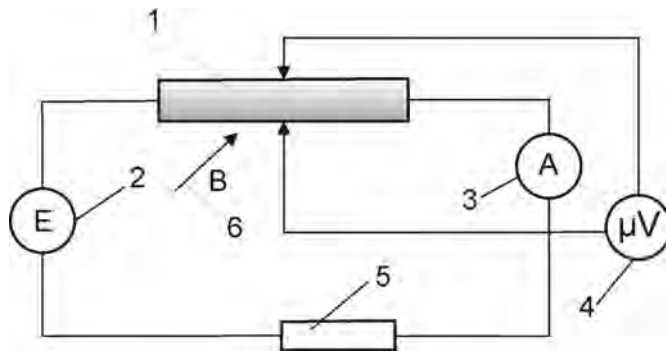


Рис. 3. Схема измерения концентрации носителей заряда с помощью эффекта Холла: 1 – измеряемый образец; 2 – источник питания; 3 – амперметр; 4 – микровольтметр; 5 – резистор; 6 – направление магнитного поля

Т а б л и ц а 1

Электрофизические параметры монокристаллов твердых растворов висмут-сурьма

№ п/п	Содержание сурьмы в монокристаллах, ат.%	Дифференциальная термо-э.д.с., мкВ/К	Удельное электросопротивление, $\rho \cdot 10^{-4}$, Ом·см	Концентрация носителей заряда, $n \cdot 10^{-18}$, см ⁻³	Подвижность электронов, $\mu \cdot 10^{-3}$ см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
1.	3	- 120	1,54	10	3,69
2.	5	- 117	1,15	8,8	0,62
3.	7	- 104	1,2	1,61	4,5

Уменьшение величины термо-э.д.с, удельного электросопротивления и концентрации носителей заряда с увеличением содержания сурьмы в монокристаллах может быть обусловлено как изменением структурного совершенства, так и изменением зонной структуры твердых растворов в полученных монокристаллах. Наиболее высоким значением подвижности обладает монокристалл твердого раствора висмута с 7 ат.% сурьмы, который обладает наименьшей плотностью дислокаций, о чем свидетельствуют ранее полученные экспериментальные данные [7].

Выводы:

1. Выращены монокристаллы твердых растворов висмута с 3, 5 и 7 ат.% сурьмы методом Чохральского.
2. Разработана методика и экспериментально измерены термо-э.д.с, удельное электросопротивление, концентрация и рассчитана подвижность носителей заряда в образцах монокристаллов твердых растворов висмут-сурьма.
3. Установлено, что при увеличении содержания сурьмы в исследованных монокристаллах уменьшается термо-э.д.с., удельное электросопротивление и концентрация носителей заряда. Наибольшей подвижностью заряда обладает монокристалл твердого раствора висмута с 7 ат.% сурьмы, что может быть обусловлено более низкой плотностью дислокаций в нем.

Л и т е р а т у р а

1. Jim G.E., Amith A. Bi-Sb alloys for magneto-thermoelectric and thermomagnetic cooling // Sol. Stat. Electr. – 1972. – V. 15. – P. 1141 – 1165.
2. Осипов Э.В. Твердотельная криогеника. – Киев: Наукова думка, 1977. – 234 с.
3. Иванов Г.А., Колпачников Г.Н., Налетов В.Л., Яковлева Т.И. Электрические и гальваномагнитные свойства сплавов висмут-сурьма в интервале температур 77 – 293 К. В кн.: Полуметаллы. Л., 1968. – С. 39 – 47.

4. Zemskov V.S., Belaya A.D., Beluy U.S., Kozhemyakin G.N. Growth and investigation of thermoelectric properties of Bi-Sb alloy single crystals // J. Cryst. Growth. – 2004. – V. 212. – P. 161 – 166.
5. Smither R.K., Fernandez P.B. Variable-metric diffraction crystals for x-ray optics // Rev. Sci. Instrum. – 1992. – V.63, №2. – P. 1755 – 1762.
6. Penzel St., Klessen H., Neumann W. Growth of Bi-Sb gradient crystals for X-ray monochromators by means of the gradient projection method // Cryst. Res. Technol. – 1997. – V.38, № 8. – P. 1137 – 1143.
7. Kozhemyakin G.N., Nalivkin M.A., Rom M.A., Mateychenko P.V. Growing Bi-Sb gradient single crystals by a modified Czochralski method // J. Cryst. Growth. – 2004. – V. 263. – P. 148 – 155.
8. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S., Cava R.J., Hasan M.Z. A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase // Nature. – 2008. – V. 452. – P. 970 – 974.

Г.М. Кожемякін, М.О. Налівкін, Е.О. Мірошніченко
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ МОНОКРИСТАЛІВ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ВІСМУТ-СУРМА

Термо-е.р.с., питомий опір, концентрація та рухомість носіїв були виміряні в нелегованих монокристалах твердих розчинів вісмуту з 3, 5 і 7 ат.% сурми, вирощених методом Чохральського. Показано, що зі збільшенням кількості сурми в монокристалах змінюються термо-е.д.с., питомий опір і концентрація носіїв заряду. Найбільшу рухливість носіїв заряду має монокристал сплаву вісмуту з 7 ат.% сурми.

Ключові слова: монокристали, тверді розчини вісмут-сурма, електрофізичні параметри.

G.N. Kozhemyakin, M.A. Nalivkin, E.A. Miroshnichenko
ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS Bi-Sb SINGLE CRYSTALS

Thermal emf, electrical resistivity, carrier concentration and mobility were measured in solid solutions of Bi with 3, 5 and 7 at% Sb single crystals grown by Czochralski method. Thermal emf, electrical resistivity and carrier concentration in the single crystals decreases with increasing Sb. Maximal mobility have solid solutions Bi with 7 at% Sb single crystal.

Keywords: single crystals, solid solutions of Bi-Sb, Electrophysical properties.

Кожемякін Геннадій Миколайович – д.т.н., проф., завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Налівкін Михайло Олексійович – к.т.н., директор ТОВ «Східної проектно-індустріальної компанії» (м. Луганськ);

Мірошніченко Євгенія Олександрівна – студентка гр. ММ-941 Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: *Харламов Ю.О.*, д.т.н., проф. кафедри обробки металів тиском і зварювання Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

КОНВЕКЦИЯ В РАСПЛАВЕ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ Ga_{0,03}In_{0,97}Sb МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Выполнен расчет конвективных течений в расплаве для условий выращивания монокристаллов твердого раствора Ga_{0,03}In_{0,97}Sb методом Чохральского. Определены осевые и радиальные скорости течений в расплаве Ga-In-Sb при заданных скоростях вытягивания и вращения монокристалла. Установлено, что наибольшей скоростью обладают течения у поверхности расплава за периферией вытягиваемого монокристалла.

Ключевые слова: монокристаллы, твердые растворы галлий-индий-сурьма, моделирование конвекции, течения.

Известно, что качество выращиваемых монокристаллов во многом определяется особенностями процессов конвективного тепло- и массопереноса в жидкой фазе. На сегодняшний день поиску способов управления процессом тепло-массопереноса в расплаве с целью снижения неоднородности компонентов в выращиваемых монокристаллах уделяется большое внимание [1-4]. Это актуально и для выращивания монокристаллов трехкомпонентных твердых растворов, обладающих специфическими электрофизическими свойствами. Особый интерес представляют твердые растворы Ga_{0,03}In_{0,97}Sb, являющиеся одним из перспективных материалов оптоэлектроники [5-7].

Целью данной работы является изучение конвекции в расплаве при выращивании монокристаллов твердого раствора Ga_{0,03}In_{0,97}Sb методом Чохральского, который позволяет управлять параметрами вытягивания в процессе роста.

Одним из основных факторов, характеризующим конвекцию, является распределение скорости конвективных течений в расплаве. Как правило, для анализа распределения скорости течений применяется уравнение Навье-Стокса [8]:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v, \nabla)v \right] = -grad p + \eta \Delta v + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) grad div v, \quad (1)$$

где ρ – плотность расплава,

$v = v(x, y, z)$ – скорость элемента расплава в точке с координатами (x, y, z) ,

p – внешнее давление, действующее на расплав,

η, ζ – коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости жидкости.

Для процесса роста кристаллов Ga_{0,03}In_{0,97}Sb методом Чохральского массопереносом, связанным с уменьшением объема расплава при вытягивании кристалла, можно пренебречь. Так как скорость вытягивания кристалла не превышает 3 мм/ч, при скорости его вращения до 2 с⁻¹ и радиусе кристалла 10 мм, величина скорости течения расплава под кристаллом составит 10 мм/с. Массоперенос, обусловленный данной скоростью конвективного течения, пренебрежимо мал в сравнении с массопереносом, вызванным вращением кристалла. Кроме того, учитывая, что давление достаточно мало изменяется в объеме расплава, изменением плотности расплава под влиянием давления можно пренебречь, а расплав Ga-In-Sb рассматривать как несжимаемую жидкость. Тогда уравнение (1) для распределения скорости течений в расплаве при выращивании монокристаллов Ga_{0,03}In_{0,97}Sb можно записать в виде:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v, \nabla)v \right] = -gradp + \eta \Delta v. \quad (2)$$

Важно также отметить, что распределение скорости течений в расплаве Ga-In-Sb можно считать квазистационарным, так как рассматривается режим выращивания кристаллов $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ при фиксированных скоростях вытягивания и вращения. Следовательно, выражение (2) приобретет вид:

$$(v, \nabla)v = -\frac{1}{\rho} gradp + \frac{\eta}{\rho} \Delta v. \quad (3)$$

Принимая во внимание результаты работы [8], представим уравнение (3) в цилиндрической системе координат (r, φ, z) при условии, что распределение скоростей не зависит от координаты φ :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0. \quad (4)$$

На основании того, что в процессе роста кристаллов $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ имеет место полное прилипание слоя расплава к стенке тигля за счет сил межмолекулярного сцепления, аналогично работе [8], граничные условия для уравнения (4) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 0} v(r, 0) &= \omega r, \\ v(R, z) &= 0, \\ v(r, h) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для получения закономерностей распределения скорости конвективных течений в расплаве Ga-In-Sb при решении уравнения (4) применялись данные работы [9]. Радиальное распределение скорости течений в области $0 \leq r \leq R_T$ (рис. 1) описывается функцией $f_1(r)$:

$$\begin{aligned} f_1(r) &= -\frac{2\omega r_\kappa}{p_0} \frac{J_1(p_0)Y_1(\xi p_0)}{J_1(\xi p_0)Y_1(p_0) - Y_1(\xi p_0)J_1(p_0)} J_1\left(p_0 \frac{r}{r_\kappa}\right) + \\ &+ \frac{2\omega r_\kappa}{p_0} \frac{J_1(\xi p_0)J_1(p_0)}{J_1(\xi p_0)Y_1(p_0) - Y_1(\xi p_0)J_1(p_0)} Y_1\left(p_0 \frac{r}{r_\kappa}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где ω – угловая скорость вращения кристалла,
 r_κ – радиус кристалла,
 ξ – отношение радиуса тигля R_T к радиусу r_κ кристалла,
 p_0 – безразмерная величина, значение которой зависит от ξ и определяется из данных работы [9],
 Y_1, J_1 – функции Бесселя.

Для роста монокристаллов $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ радиальное распределение скорости течений в области $0 \leq r \leq R_T$ представлено на рис. 2. Из графика видно, что максимальная скорость конвективных течений наблюдается в центральной части тигля и практически не зависит от радиуса кристалла.

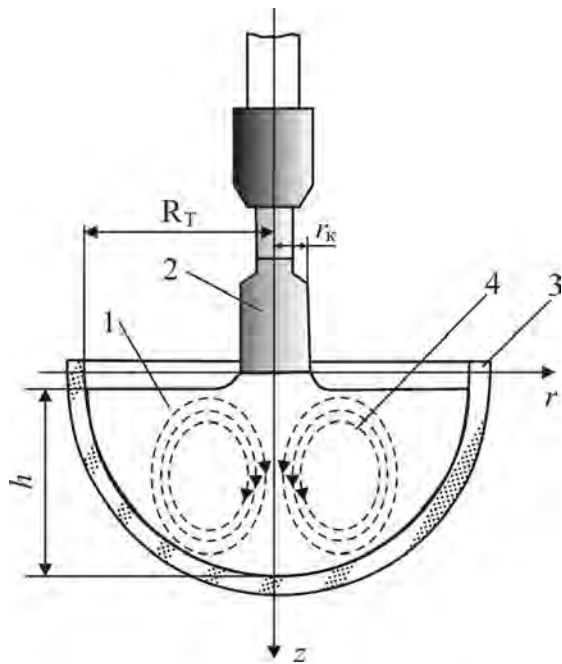


Рис. 1. Схема конвективных потоков в тигле в процессе роста монокристаллов $Ga_{0,03}In_{0,97}Sb$

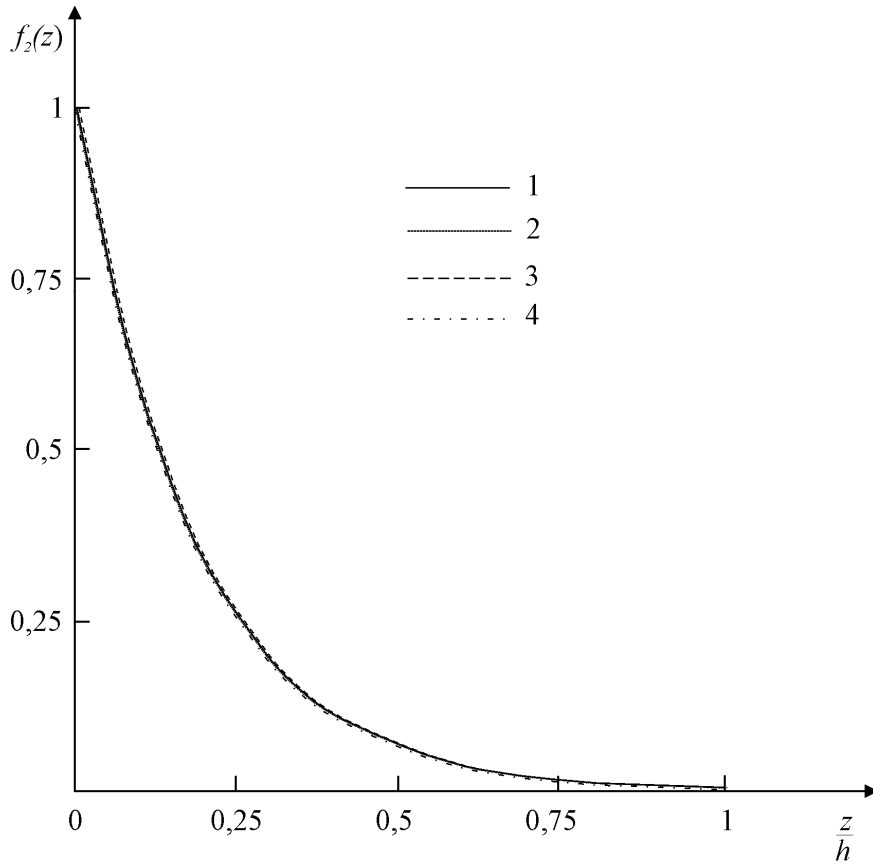


Рис. 2. Радиальное распределение скорости конвективных течений в расплаве $Ga-In-Sb$ в процессе роста монокристаллов $Ga_{0,03}In_{0,97}Sb$: 1 – $r = 5$ мм; 2 – $r = 5,5$ мм; 3 – $r = 6$ мм; 4 – $r = 6,7$ мм; 5 – $r = 10$ мм; 6 – $r = 12$ мм

Осевое распределение скоростей в области $0 \leq z \leq h$ (рис. 1) описывается функцией $f_2(z)$:

$$f_2(z) = \cosh\left(\chi p_0 \frac{z}{h}\right) - \coth(\chi p_0) \sinh\left(\chi p_0 \frac{z}{h}\right), \quad (7)$$

где h – высота расплава,
 χ – отношение высоты расплава h к радиусу r_k .

Осевое распределение скорости конвективных течений в области $0 \leq z \leq h$ приведено на рис. 3. Из зависимости $f_2(z)$ очевидно, что максимальная скорость конвективных течений наблюдается при $z = 0$. Причем кривые, построенные при различных значениях ξ и p_0 , свидетельствуют о том, что изменение радиуса кристалла от 5 мм до 12 мм не оказывает значительного влияния на скорость в осевом направлении конвективного потока.

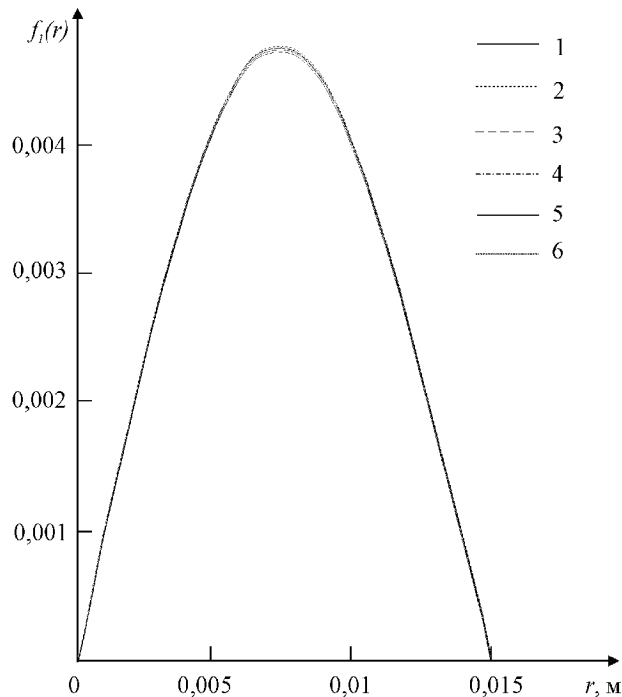


Рис. 3. Осевое распределение скорости конвективных течений в расплаве Ga-In-Sb в процессе роста монокристаллов $Ga_{0,03}In_{0,97}Sb$: 1 – $\xi = 1,25$, $p_0 = 3,065$, $\chi = 1,8$; 2 – $\xi = 1,5$, $p_0 = 2,554$, $\chi = 2,2$; 3 – $\xi = 2,14$, $p_0 = 1,916$, $\chi = 3$

Согласно работе [9], аппроксимируя выражение (6) функцией Бесселя $J_1\left(p_0 \frac{r}{r_k}\right)$, распределение скорости конвективных потоков с учетом переноса тепла за счет движения расплава в общем виде можно представить как:

$$v(r, z) = \frac{2\omega r_k}{p_0} J_1\left(p_0 \frac{r}{r_k}\right) \cdot \left[\cosh\left(\chi p_0 \frac{z}{h}\right) - \coth(\chi p_0) \right] \sinh\left(\chi p_0 \frac{z}{h}\right). \quad (8)$$

Результаты расчетов скорости конвективных потоков в двух взаимно перпендикулярных направлениях также представлены графически на рис. 4. Для условий роста мо-

нокристаллов $\text{Ga}_{0.03}\text{In}_{0.97}\text{Sb}$ при $r_k = 5 \text{ мм}$, $\omega = 1,047 \text{ с}^{-1}$ максимальная скорость конвективных потоков наблюдается в точке расплава с координатами $r = 0,0075 \text{ мм}$, $z = 0$ и составляет $4,76 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Важно отметить, что при варьировании угловой скорости вращения от $0,105 \text{ с}^{-1}$ до $2,093 \text{ с}^{-1}$ и соответственно частотах вращения от 1 до 20 об/мин, скорость конвективных потоков в точке с координатами $r = 0,0075 \text{ мм}$, $z = 0$ увеличивается от $4,65 \cdot 10^{-4}$ до $9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ и не зависит от изменения радиуса кристалла.

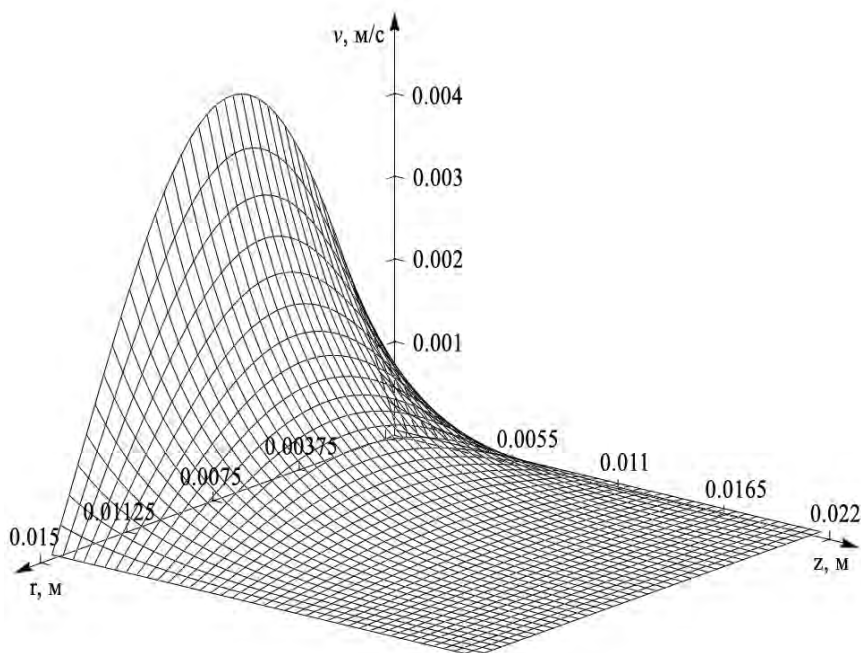


Рис. 4. Распределение скорости конвективных течений расплава Ga-In-Sb в процессе роста монокристаллов $\text{Ga}_{0.03}\text{In}_{0.97}\text{Sb}$

Выводы:

1. Изучена конвекция в расплаве при выращивании монокристаллов твердого раствора $\text{Ga}_{0.03}\text{In}_{0.97}\text{Sb}$ методом Чохральского.
2. Рассчитаны радиальное и осевое распределения скоростей течений расплава без вращения тигля.
3. Показано, что увеличение частоты вращения кристалла от 1 до 20 об/мин повышает максимальную скорость конвективных потоков от $4,65 \cdot 10^{-4}$ до $9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

Литература

1. Кервалишвили П.Д., Ремизов И.А. О возможности улучшения перемешивания расплава при выращивании кристаллов по методу Чохральского // Неорганические материалы. 1989. – Т. 16. – № 10– С. 1727 – 1732.
2. Kokh A. Crystal growth through forced stirring of melt or solution in Czochralski configuration // J. Cryst. Growth. 1998. – V. 19. – P. 774 – 778.
3. Scheel H.J., Schulz-Duboiz E.O. Flux growth of large crystals by accelerated crucible rotation technique // J. Cryst. Growth. 1971. – V. 8. – P. 304 – 306.
4. Kokh A.E., Kononova N.G. Crystal growth under heat rotation conditions // Solid State Electronics. 2000. – V. 44. – № 5. – P. 819 – 824.
5. Золкина Л.В., Кожемякин Г.Н., Ром М.А. Совершенство структуры и электрофизические свойства монокристаллов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ // Вісник Східноукраїнського національного університету. Серія транспорт. – Луганськ: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 2006. – №9(103). – С. 211 – 218.
6. Kozhemyakin G.N., Zolkina L.V., Rom M.A. Influence of ultrasound on the growth striations and electrophysical properties of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ single crystals // Solid State Electronics. – 51, 2007. – P. 820–822.

7. Kozhemyakin G.N., Zolkina L.V., Rom M.A. Effect of Ultrasound on the Striation Microinhomogeneity and Electrical Properties of $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ Single Crystals // Crystallography Reports. – Vol. 53., №7, 2008. – P. 1236–1240.

8. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высш. шк., – 2001. – 550 с.

9. Тумаев Е.Н., Гаража Е.В. Распределение скоростей в расплаве при выращивании кристаллов методом Чохральского [Электронный документ] (kubstu.ru/fh/fams/st9.doc).

References

1. Kervalishvili P.D., Remizov I.A. O vozmozhnosti uluchsheniya peremeshivaniya rasplava pri vyravivaniy kristallov po metodu Chohral'skogo // Neorganicheskie materialy. 1989. – T. 16. – № 10– S. 1727 – 1732.

2. Kokh A. Crystal growth through forced stirring of melt or solution in Czochralski configuration // J. Cryst. Growth. 1998. – V. 19. – P. 774 – 778.

3. Scheel H.J., Schulz-Duboiz E.O. Flux growth of large crystals by accelerated crucible rotation technique // J. Cryst. Growth. 1971. – V. 8. – P. 304 – 306.

4. Kokh A.E., Kononova N.G. Crystal growth under heat rotation conditions // Solid State Electronics. 2000. – V. 44. – № 5. – P. 819 – 824.

5. Zolkina L.V., Kozhemjakin G.N., Rom M.A. Sovershenstvo struktury i jelektrofizicheskie svojstva monokristallov $GaxIn_{1-x}Sb$ // Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu. Serija transport. – Lugans'k: Shidnoukraïns'kij nacional'nij universitet imeni Volodimira Dalja. – 2006. – №9(103). – S. 211 – 218.

6. Kozhemyakin G.N., Zolkina L.V., Rom M.A. Influence of ultrasound on the growth striations and electrophysical properties of $GaxIn_{1-x}Sb$ single crystals // Solid State Electronics. – 51, 2007. – P. 820–822.

7. Kozhemyakin G.N., Zolkina L.V., Rom M.A. Effect of Ultrasound on the Striation Microinhomogeneity and Electrical Properties of $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ Single Crystals // Crystallography Reports. – Vol. 53., №7, 2008. – P. 1236–1240.

8. Kartashov Je.M. Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel. – М.: Vyssh. shk., – 2001. – 550 s.

9. Tumaev E.N., Garazha E.V. Raspredelenie skorostej v rasplave pri vyravivaniy kristallov metodom Chohral'skogo [Jelektronnyj dokument] (kubstu.ru/fh/fams/st9.doc).

Г.М. Кожемякін, Л.В. Немець

КОНВЕКЦІЯ В РАСПЛАВІ ПРИ ВИРОЩУВАННІ МОНОКРИСТАЛІВ $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО

Виконані розрахунки конвективних течій в розплаві для умов вирощування монокристалів твердого розчину $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ методом Чохральського. Вилучені осьові та радіальні швидкості течій в розплаві $Ga-In-Sb$ при заданих швидкостях витягування і обертання монокристалу. Встановлено, що найбільшу швидкість мають течії у поверхні розплаву за периферією витягуємого монокристалу.

Ключові слова: монокристали, тверди розчини галій-індій-сурма, моделювання конвекції, течії.

G.N. Kozhemyakin, L.V. Nemets

CONVECTION IN THE MELT FOR GROWTH $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ SINGLE CRYSTALS BY CZOCHRALSKI METHOD

The calculation of convective flow in the melt for the growth conditions of $Ga_{0.03}In_{0.97}Sb$ single crystals by Czochralski method. Axial and radial speed of flow in $Ga-In-Sb$ melt at different pulling rate and rotation were calculated. Flow has maximal speed at the melt surface near periphery of pulling crystal.

Keywords: single crystals, solid solutions $Ga-In-Sb$, convection modeling, flow.

Кожемякін Геннадій Миколайович – д.т.н., проф., завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Немець Людмила Вікторівна – к.т.н. доц. кафедри мікро- та наноелектроніки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Харламов Ю.О., д.т.н., проф. кафедри обробки металів тиском і зварювання Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ РЕССОРНЫМ
ПОДВЕШИВАНИЕМ НА ТРАНСПОРТЕ**

Цель данной статьи заключается в разработке системы управления пневматическим рессорным подвешиванием, позволяющей улучшить комфорт пассажиров и уменьшить динамическое воздействие на путь. Предметом исследования является пневматическое рессорное подвешивание скоростного железнодорожного транспорта. Работа выполнена методом теоретического исследования функционирования системы управления пневматического рессорного подвешивания. В статье решена задача по обеспечению стабильного положения кузова относительно плоскости пути, разработана структура и алгоритм работы системы управления пневматическим рессорным подвешиванием. Алгоритм работы системы описывается следующим образом, при движении транспортного средства происходит вертикальное относительное перемещение рычага высоторегулирующего клапана из одного крайнего состояния в другое. В зависимости от отклонения формируется сигнал $\Delta_{откл}$, который поступает на ЭВМ. При превышении уровня необходимо включить сбрасывающий электропневматический клапан, который выпустит некоторое количество сжатого воздуха, а при уменьшении уровня, необходимо включить электропневматический клапан нагнетающей магистрали, через который подается сжатый воздух в пневморессору. Задаваемый поворот вала серводвигателя устанавливает необходимое для демпфирования сечение дросселя. Разработанная система управления рекомендуется для использования на пассажирском скоростном железнодорожном транспорте. Выводы: система позволяет перенастроить характеристики пневморессоры в зависимости от состояния пути, что дает возможность улучшить комфорт пассажиров и уменьшить динамическое воздействие на путь; кроме того разработанная система исключает излишний расход сжатого воздуха и защищена от ложных срабатываний при действии случайных факторов.

Ключевые слова: пневморессора, датчик, серводвигатель, трехступенчатый дроссель, электропневматические клапаны, GPS-навигатор.

В настоящее время скорости движения пассажирских поездов возрастают до 200 км/час, что, учитывая состояние рельсового пути, выдвигает на первый план проблемы улучшения комфорта для пассажиров и уменьшения динамического воздействия на путь.

Применение систем рессорного подвешивания на основе пневматических рессор является одним из путей решения этих проблем. Однако, их эксплуатация показывает, что один из основных элементов – регулятор положения кузова (высоторегулирующий клапан «ВК») по стабильности характеристик не соответствует современному техническому уровню, так как требует затрат на проведение регулировочных работ.

В частности, работа ВК, не имеющих замедлителей, сопровождается значительной потерей сжатого воздуха при колебаниях кузова на пневморессорах. Работа ВК, в которых применяются гидравлические замедлители, зависит от условий окружающей среды в связи с изменением вязкости жидкости, что требует их перенастройки. Они также экологически несовершенны из-за возможных утечек рабочей жидкости. Более совершенными являются ВК с электрическими замедлителями, поскольку их работа не зависит от условий окружающей среды, они более просты в настройке. Однако износ и подгорание контактов датчика положения кузова не обеспечивает должной стабильности работы всей системы в целом.

Более совершенным является регулятор положения кузова, у которого исключены трущиеся пары, а подгорающие электрические контакты заменены бесконтактным индуктивным датчиком. Однако аналоговому исполнительному устройству, свойственна нестабильность состояний, зависящих от условий окружающей среды, разброса параметров аналоговых элементов и сложность настройки. Цель данной статьи заключается

в разработке системы регулирования положения кузова транспортного средства по высоте относительно плоскости пути при пневматическом рессорном подвешивании, исключающей перечисленные выше недостатки. Данная система управления пневморессорой отличается от типовой, установленной на электропоезде ЭР-200, возможностью производить управление демпфированием колебаний, регулировать уровень пола в зависимости не только от статического прогиба, но и от скорости движения и состояния пути.

В статье рассмотрены задача, структура и алгоритм работы системы управления пневматическим рессорным подвешиванием транспортных средств (рис.1).

Задача управления формулируется следующим образом – необходимо обеспечить стабильное положение кузова относительно плоскости пути в заданном интервале, при возможном изменении от среднего положения ± 40 мм и регулирование демпфированием в зависимости от скорости движения транспортного средства и состояния пути.

Объектом управления является пневморессора. В качестве исполнительных устройств используются два электропневматических вентиля. Один из них нагнетающий, а другой сбрасывающий сжатый воздух из пневморессоры. А также трехступенчатый дроссель, регулирующий подачу воздуха от дополнительного резервуара в пневморессору.

Для регулирования высоты уровня пола, необходимо определить положение кузова транспортного средства над уровнем плоскости пути относительно номинального значения. Для этого используется измерительная подсистема. Она представляет собой модуль в состав, которого входят три подсистемы: измерительная, решающая (управляющая) и исполнительная.

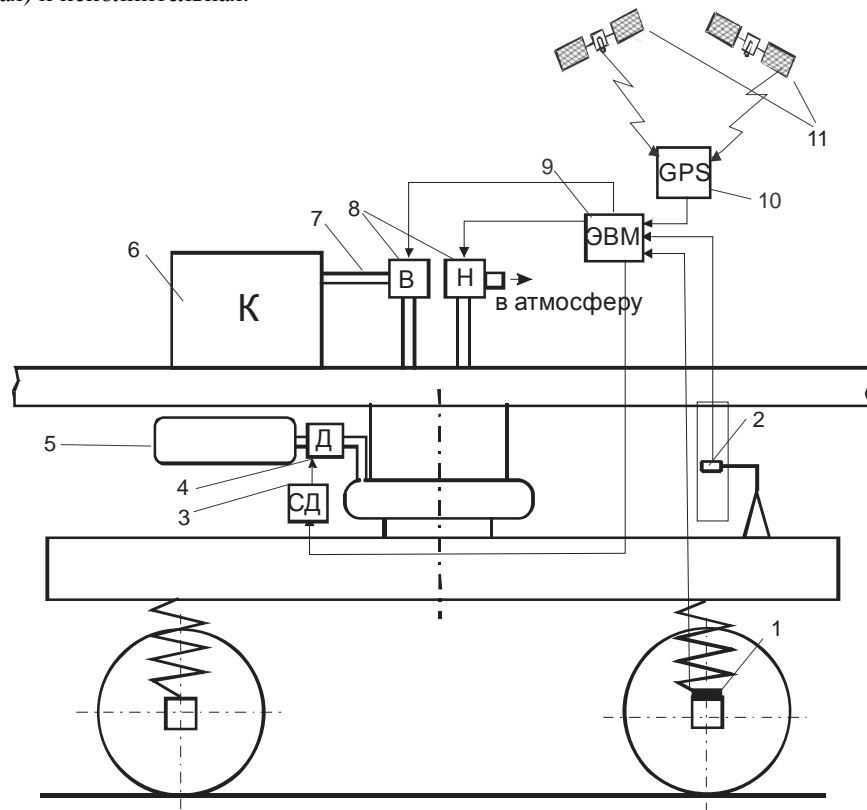


Рис. 1. Система управления пневматическим рессорным подвешиванием на транспорте
 1-датчик ускорения; 2- датчик высоты уровня пола; 3-серводвигатель; 4-трехступенчатый дроссель; 5- дополнительный резервуар; 6 – компрессор; 7- соединительный трубопровод; 8 – электропневматические вентили; 9 – ЭВМ; 10 – GPS-навигатор; 11 – спутники GPS-системы

Измерительная подсистема.

1. Датчик высоты уровня пола состоит из двух прямоугольных пластин, которые совершают продольные перемещения относительно вертикальной оси транспортного средства. Пластины установлены таким образом, что они не соприкасаются друг с другом. На одной из них установлены герконовые датчики, типа ВВ5.42.хх.хх,10.5.К, расстояние между которыми составляет 3 мм. Одним концом эта пластина жестко закреплена на раме кузова. Вторая пластина одним из своих концов жестко закреплена на раме тележки, на другом ее конце расположен постоянный магнит. При движении транспортного средства происходит вертикальное относительное перемещение магнита вдоль пластины с герконовыми датчиками. В зависимости от отклонения магнита относительно начального положения (вверх-вниз) формируется сигнал $\Delta_{откл}$, который поступает на ЭВМ.

2. Датчика ускорения ММА1213D, считывающего геометрические неровности пути.

3. GPS-системы, определяющей положение объекта в двух плоскостях (в вертикальной и горизонтальной).

Управляющая подсистема.

1. ЭВМ, которая имеет внешний (системный) интерфейс для обеспечения связи между подсистемами.

Исполнительная подсистема.

1. Два электропневматических вентиля типа ВВ-32.

Вентиль электропневматический ВВ-32 ТУ 16-559.341-04 предназначен для управления процессом наполнения-опорожнения в пневморессоры.

2. Серводвигатель АВВ серии 9С, который через вал жестко соединен с осью трехступенчатого дросселя. В зависимости от сигнала, поступающего с ЭВМ, серводвигатель поворотом своей оси регулирует положение дроссельной заслонки.

3. Трехступенчатый дроссель.

Алгоритм работы управляющей системы описывается, следующим образом, датчик высоты уровня пола во время движения выдает непрерывную последовательность электрических сигналов. Сигналы представляют точное, соответствующее пути отображение колебаний кузова и поступают на ЭВМ. Полученные сигналы сравниваются с заранее установленными значениями возможных колебаний (согласно карты пути маршрутов движения). Производится вычисление фазы смещения колебаний. В зависимости от величины противофазы вырабатывается управляемый сигнал, который поступает на один из электропневматических клапанов и на серводвигатель. При превышении уровня более 3 мм необходимо включить сбрасывающий электропневматический вентиль, который выпустит некоторое количество сжатого воздуха, а при уменьшении уровня, более чем на 3 мм, необходимо включить электропневматический вентиль нагнетающей магистрали, через который подается сжатый воздух в пневморессору. Задаваемый поворот вала серводвигателя устанавливает необходимое для демпфирования сечение дросселя.

Алгоритм работы системы должен быть устойчивым к влияющим факторам – колебаниям и вибрациям, возникающим при движении транспортного средства по реальному рельсовому пути. Реализация управляющих воздействий должна обеспечиваться с некоторой временной задержкой (5-10 с), чтобы эти колебания не вызывали срабатывания системы ведущих к увеличенному расходу воздуха для питания пневморессор. Кроме того, необходимо обеспечивать возможность дистанционного изменения настроек системы (например, для обеспечения прохождения кривых участков пути).

На основании проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

- применение GPS – системы позволяет за ранее перенастраивать жесткостные характеристики пневморессоры, что позволяет улучшить комфорт для пассажиров и уменьшить динамическое воздействия на путь;

- разработанная система позволяет более гибко управлять гашением колебаний подвижного скоростного состава;

- предлагаемая система исключает излишний расход сжатого воздуха через электропневматические вентили при колебаниях кузова на пневматических рессорах, нечувствительна к изменению внешних климатических условий, защищена от ложных срабатываний при действии случайных факторов;

- данная система не требует настройки в процессе эксплуатации, содержит минимальное количество изнашивающихся пар трения и электрических контактов, что позволяет рекомендовать ее для использования на современном скоростном транспорте.

Л и т е р а т у р а

1. Декларацийний патент на корисну модель №21577 «Система картографії маршрутів руху для залізничного транспорту» от 15.03.2007 р. Бюл. №.3 Вівденко Ю.Г., Маслієв В.Г., Краснобрыжева Ю.С., Спірягін В.І., Спірягін М.І.

2. Достоинства и недостатки технологии наклона кузова / Железные дороги мира — 2009, № 7. — 60-66 с..

3. Применение мехатроники при создании регуляторов пневматического рессорного подвешивания на транспорте / Макаренко Ю.В., Балеv В.Н., Маслиев В.Г. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2010. — № 38. — 72 – 75 с.

References

1. Deklaracijnij patent na korisnu model' №21577 «Sistema kartografii marshrutiv ruhu dlja zaliznichnogo transportu» ot 15.03.2007 r. Bjul. №.3 Vivdenko Ju.G., Masliev V.G., Krasnobrizheva Ju.S., Spirjagin V.I., Spirjagin M.I.

2. Dostoinstva i nedostatki tehnologii naklona kuzova / Zheleznye dorogi mira — 2009, № 7. — 60-66 s..

3. Primenenie mehatroniki pri sozdanii reguljatorov pnevmaticheskogo resornogo podvshivaniya na transporte / Makarenko Ju.V., Balev V.N., Masliev V.G. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Transportne mashinobuduvannja. — Harkiv: NTU «HPI». — 2010. — № 38. — 72 – 75 s.

Вівденко Ю.Г., Краснобрыжева Ю.С.

Система управління пневматичним ресорним підвішуванням на транспорті

Ціль даної статті полягає в розробці системи керування пневматичним ресорним підвішуванням, що дозволяє поліпшити комфорт пасажирів і зменшити динамічний вплив на колію. Предметом дослідження є пневматичне ресорне підвішування швидкісного залізничного транспорту. Робота виконана методом теоретичного дослідження функціонування системи керування пневматичного ресорного підвішування. У статті вирішена задача по забезпеченню стабільного положення кузова щодо площини колії, розроблені структура й алгоритм роботи системи керування пневматичним ресорним підвішуванням. Алгоритм роботи системи описується в такій спосіб, при русі транспортного засобу відбувається вертикальне відносне переміщення важеля висоторегулюючого клапана з одного крайнього стану в інше. Залежно від відхилення формується сигнал $\Delta_{\text{откл}}$, що надходить на ЕОМ. При перевищенні рівня необхідно ввімкнути скидальний електропневматичний вентиль, що випустить деяку кількість стисненого повітря, а при зменшенні рівня, необхідно ввімкнути електропневматичний вентиль нагнітаючої магістралі, через який подається стиснене повітря в пневморесору. Поворот вала серводвигуна встановлює необхідне для демпфірування переріз дроселя. Розроблена система керування рекомендується для використання на пасажирському швидкісному залізничному транспорті. Висновки: система дозволяє перенастроювати характеристики пневморесори залежно від стану колії, що дає можливість поліпшити комфорт пасажирів і зменшити динамічний вплив на колію; крім того розроблена система виключає зайву витрату стисненого повітря й захищена від помилкових спрацьовувань при дії випадкових факторів.

Ключові слова: пневморесора, датчик, серводвигун, дросель, електропневматичні вентилі, GPS-навігатор.

Vivdenko Yu.G., Krasnobrygeva Yu.S.

Pneumatic control system for transport spring suspension

The purpose of this paper is to develop a control system pneumatic spring suspension, which allows to improve passenger comfort and reduce the dynamic impact on the way. The subject of this study

is air spring suspension speed rail transport. This work was the method of theoretical investigation management system air spring suspension. In this paper we solve the problem to ensure a stable position relative to the plane of the body the way, developed a structure and algorithm of the control system pneumatic spring suspension. The algorithm of the system is described as follows, when the vehicle is vertical relative movement of the lever valve regulating the height, from one extreme state to another. Depending on the deviation of forming a signal $\Delta_{\text{омкл}}$ which is fed to a computer. if you exceed the level necessary to include dropping electro-valve that will release a certain amount of compressed air, and with a decrease in the level, you must enable electropneumatic valve forcing highway through which compressed air is supplied to the air springs. Given by the rotation of the shaft servomotor sets necessary to dampen the throttle section. the developed control system is recommended for use on a passenger high-speed rail transport. Conclusions: the system allows you to reconfigure the characteristics of air springs depending on the path, which makes it possible to improve passenger comfort and reduce the dynamic impact on the way, besides the developed system eliminates the excessive consumption of compressed air and protected from false positives under the influence of random factors.

Keywords: air suspension, sensor, servomotor, three-stage reactor, electro-pneumatic valves, GPS-navigator.

Вивденко Ю.Г. – к.т.н., доцент кафедры «Метрология» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Краснобрыжева Ю.С. – ассистент кафедры «Прикладная математика» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Горбунов Н.И., д.т.н., проф. кафедры «Железнодорожный транспорт» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 519.83

Б.Н. Локотш, Л.В. Капуста

г. Луганск

ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИИ ТЕОРИИ ИГР ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ БОЛЬШИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Статья посвящена возможности применения теории игр в ситуациях, обладающих неполной информацией, например при разработке прогнозов для оптимального тестирования работы больших энергосистем.

Ключевые слова: теория игр, стратегия, условия неопределенности, матрица, энергосистема.

На практике часто приходится сталкиваться с задачами, в которых необходимо принимать решения в условиях неопределенности, т.е. возникают ситуации, в которых две (или более) стороны преследуют различные цели, а результаты любого условия каждой из сторон зависят от мероприятий партнёра. Такие ситуации относятся к конфликтным: результат каждого хода игрока зависит от ответного хода противника, цель игры – выигрыш одного из партнёров. В реальной жизни конфликтные ситуации встречаются очень часто и имеют многообразный характер.

Теория игр – математический метод изучения оптимальных стратегий в играх. Под игрой понимается процесс, в котором участвуют две и более сторон, ведущих борьбу за реализацию своих интересов. Каждая из сторон имеет свою цель и использует некоторую стратегию, которая может вести к выигрышу или проигрышу – в зависимости от поведения других игроков.

Теория игр помогает выбрать лучшие стратегии с учетом представлений о других участниках, их ресурсах и их возможных поступках. Теория игр – это раздел прикладной математики, точнее – исследование операций.[1]

Чаще всего методы теории игр находят применение в экономике, чуть реже в других общественных науках – социологии, политологии, психологии, этике и других. Начиная с 1970-х годов её взяли на вооружение биологи для исследования поведения животных и теории эволюции. Очень важное значение она имеет для искусственного интеллекта и кибернетики, особенно с проявлением интереса к интеллектуальным агентам.

В ситуациях, когда имеется неполнота информации, которая порождает вероятность развития ситуации и когда имеется наличие конфликтов при развитии ситуации, применяются элементы теории игр.

Теория игр рассматривает математические методы разрешения конфликтных ситуаций, поэтому модель данной ситуации представляется в виде игры. Игры бывают: *антагонистические*, в которых участвуют реальные противники или оппоненты (конкуренция в экономике, политическая борьба, военные конфликты) и *неантагонистические* («игры с природой»).

Игры – наиболее простые, сравнительно легко поддающиеся анализу и дедуктивному моделированию формы целесообразного поведения систем.

Игровые логические машины интересны тем, что работа над ними помогает четко сформулировать и проверить общую теорию целесообразного поведения. Теория игр выводит методы, равно пригодные для целых классов игр и даже для всех игр, какие на свете есть или еще могут быть изобретены.

Эти методы оказываются пригодными при планировании военных операций, экономических решений, разрешения всевозможных производственных и житейских ситуаций.

Современные электроэнергетические системы являются «большими системами» кибернетического типа со специальными свойствами, учет которых предопределяет стратегию их развития и особенности функционирования. Эти свойства в полной мере должны учитываться при оценке возможных путей создания и развития такого рода систем. Недостаточный учет этих возможностей и особенностей электроэнергетики как большой системы приводит к ошибочным суждениям и серьёзным просчетам.

Всякое упорядоченное поведение можно представить как игру, а всякие критерии целесообразности – как «платежную матрицу» в этой игре.

Имеется два класса игр:

1. Более простой класс не учитывает обратного воздействия избранной нами стратегии на причины, мешающие достичь цели сразу – это неантагонистические игры. Так мы «играем» с природой.

2. Антагонистическая игра – партнер испытывает активное сопротивление. Противник пытается экстраполировать, исходя из последовательности ранее сделанных нами ходов. И если это не лучшее в строго теоретическом смысле, то в игре догадливость может принести преимущество.

Критерии теории игр основаны на фундаментальной теореме теории парных игр, известной как «теорема о минимаксе».

Она выражена следующими уравнениями, из которых вытекает критерий минимакса:

$$(1) \quad \alpha = \max_i \min_j a_{ij} \text{ – максимин – максимальные значения минимумов по строкам платежной матрицы.}$$

$$(2) \quad \beta = \min_j \max_i a_{ij} \text{ – минимакс – минимальное значение максимумов по столбцам платежной матрицы.}$$

Если парная игра имеет седловую точку, то она определяется как минимум своей строки и максимум своего столбца. Существует пара оптимальных стратегий, которой соответствует цена игры: $\alpha \leq \gamma \leq \beta$. При этом α – нижняя цена игры, т.е. гарантированный, хотя и минимальный выигрыш; β – верхняя цена игры – т.е. минимальный проигрыш.

Рассмотрим ряд критериев теории игр, применяемых на примере разработок прогнозов для оптимального тестирования работы больших энергосистем. [2]

Проведём расчеты для всех альтернатив U_i . Получим платежную матрицу нагрузки затрат (табл 1.) (строка i -я, столбец j -й).

Т а б л и ц а 1

P_j	P_1	P_2	.....	P_i	.....	P_j	.....	P_n
U_i	z_{i1}	z_{i2}	.....	z_{ii}	.....	z_{ij}	.....	z_{in}
U_1	z_{11}	z_{12}	.....	z_{1i}	.....	z_{1j}	.....	z_{1n}
U_2	z_{21}	z_{22}	.....	z_{2i}	.....	z_{2j}	.....	z_{2n}
.....
U_i	z_{i1}	z_{i2}	.....	z_{ii}	.....	z_{ij}	.....	z_{in}
.....
U_j	z_{j1}	z_{j2}	.....	z_{ji}	.....	z_{jj}	.....	z_{jn}
.....
U_n	z_{n1}	z_{n2}	.....	z_{ni}	.....	z_{nj}	.....	z_{nn}

Чтобы все U_i были пригодны для условий P_j нужны затраты на адаптацию альтернативы U_i к условиям P_j : $z_{ij}=z(U_i, P_j)$, $i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$.

По главной диагонали располагаются все условно-оптимальные решения (при данных условиях j). Поэтому оптимальные планы можно найти, привлекая дополнительные критерии, например известные критерии теории игр (см. табл.2).

Критерий минимакса (критерий Вальда) – критерий пессимизма – какой бы план не приняли, условия реализации – самые плохие (противник – природа, незлонамеренно чинит нам козни – игры с природой – неантагонистические в принципе)

Т а б л и ц а 2

Платежная матрица (матрица затрат)

P_j	P_1	P_2	P_3
U_i			
U_1	45	60	85
U_2	60	55	80
U_3	65	70	75

Если план U_i оптимален для P_1 , то обязательно появится нагрузка не P_1 , а P_3 . Надо принять такой план, для которого $z_{i \max}$ меньше, чем для любого другого плана. Найдем «платежи» максимумы для всех z_{ij} для всех i :

$$\begin{cases} \max Z_{1j} = Z_{13} = 85 \\ \max Z_{2j} = Z_{23} = 80 \\ \max Z_{3j} = Z_{33} = 75 \end{cases}. \quad (3)$$

Оптимальное решение – седловая точка:

$$Z_{седл}^{on} = \max_j \min_i Z_{ij} = Z_{33} = 75 \quad (4)$$

«Минимизирующий» игрок – верхняя цена игры – это минимальное значение максимума по столбцам (j); гарантируются наименьшие затраты при самых плохих условиях:

$$(5) \quad Z^{on} = \max_j \min_i Z_{ij} = Z_{седл} = 75 \text{ – максимальное значение мини-}$$

муму по строкам.

$$(6) \quad Z_{седл} = 75 = Z_{33} \text{ – «седловая точка» – min своей строки и max}$$

своего столбца. Это оптимальная стратегия.

Критерий минимакса, реализуя принцип осторожности – каждому U_i примешивается наибольшая вероятность появления самых плохих условий P_j , для которых получен $\max Z_{ij}$. Используется в особо ответственных случаях, когда требуется минимальный риск получить наибольшие затраты.

Например производится расчет для отыскания предельных режимов по статической устойчивости электросистемы с помощью последовательного утяжеления режима, который попадает в разные точки границы области устойчивости. Разным точкам соответствуют разные запасы устойчивости. Ориентироваться приходится на \max , т.е. на самый неблагоприятный случай. Так же поступают, когда речь идет об ответственности для жизни людей.

Критерий минимакса (критерий Сэвиджа) – реализует стратегию «азартного игрока», оптимиста. Ожидается, что природа (противник) предоставит нам наилучшие условия, тогда следует принять план, дающий минимальные затраты в самых благоприятных условиях:

$$(7) \quad \min_i \min_j Z_{ij} = 45 = Z_{11}; \quad U^{on} = U_1$$

Здесь каждый план $\min Z_{ij}$ считается наиболее вероятным для каждого i , а планы $\min Z_{ij}$ для разных j – равновероятные, т.е. это извечный принцип «авось получится».

Однако к нему прибегают редко, например, при выборе схемы питания потребителя III категории надежности. При этом пренебрегают возможностью весьма длительных перерывов питания сети из-за повреждения оборудования.

Критерий Гурвица – пессимизма-оптимизма, каждая из стратегий j имеет свой риск. Наибольший риск приводит к проигрышу $Z_{нк}(U_n, P_k) = \max_j Z_{ij}$ (8), а наименьший

риск к проигрышу $Z_{ме}(U_m, P_e) = \min_j Z_{ij}$ (9). Образует функцию (10):

$$Z = \alpha \max_j Z_{ij} + (1 - \alpha) \min_j Z_{ij}, 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (10)$$

$$Z^{on} = \min \left[\alpha \max_j Z_{ij} + (1 - \alpha) \min_j Z_{ij} \right], \quad (11)$$

$$\sqrt{Z^{on}} = \min Z. \quad (12)$$

При $\alpha=1$ получаем критерий минимакса

$$Z^{on} = \min_i \max_j Z_{ij}, \quad (13)$$

а при $\alpha=0$ – критерий минимина

$$Z^{on} = \min_i \min_j Z_{ij}. \quad (14)$$

При каких-то α будут иметь место наиболее вероятные условия, однако исходная информация о зоне неопределенности не дает оснований для выбора α . Только на основе набранной статистики и с помощью интуиции можно выбрать значение α .

Оптимизация в условиях неопределенности при составлении различных планов управления и экономики связана с тем, что мы не имеем определенной оптимальной точки, а только область оптимальных решений (рис. 1).

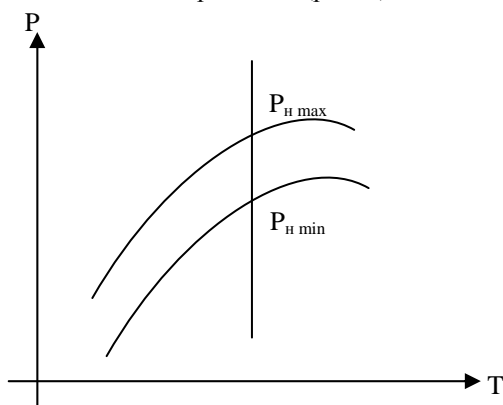


Рис. 1. Зависимость потребляемой мощности от времени

Рассмотрим такую ситуацию на примере планирования работы крупных энергосистем. При этом известны только минимальные и максимальные нагрузки с определенной долей вероятности в различные календарные периоды.

Эффективность работы энергосистемы определяется оптимальным использованием мощностей электростанции, удовлетворяющей качеству электроэнергии (U, f , качество гармоник) и потребности потребителя.

Любая энергосистема имеет ограничение по мощности: $P_{n \max}$ и $P_{n \min}$, и характеризуется следующими данными математической модели:

$$\phi(x_i) \rightarrow \min, \quad (15)$$

$$f_j(x_i) = 0, \quad (16)$$

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad (17)$$

(15) – целевая функция представляет собой функцию приведенных затрат или экономический критерий и служит критерием качества для составления плана.

(16) – система уравнений связи.

(17) – ограничивающие параметры системы.

$$\varphi(x_i)_{\min} \leq \varphi(x_i) \leq \varphi(x_i)_{\max} \quad (18)$$

(19) – функциональные ограничения, когда ограничиваются не сами параметры, а их функции.

Первоначально определим приведенные затраты для каждого плана производства и потребления электроэнергии.

Целевая функция выглядит так:

$$Z = E_n \cdot K + U \rightarrow \min \quad (19)$$

U – издержки производства электроэнергии;

E_n – нормативный коэффициент капиталовложений;

K – капиталовложения в энергосистему;

Z – приведенные затраты для производства единицы электроэнергии.

Ранее применялось два метода решения таких задач:

1. метод оценочных моделей;

2. метод оптимизирующих моделей.

При сравнительно небольшой многомерности задачи, например, электроснабжение небольшого предприятия или районная энергосеть, рассматривалось 5-10 вариантов, и выбирался приемлемый. Но при этом задача всегда считалась детерминированной.

Второй метод, также исходя из того, что задача является детерминированной, составлялась математическая модель с критерием оптимизации, находился оптимум целевой функции (max или min) с помощью алгоритма, программы, ЭВМ.

Одноцелевая оптимизация при вероятностной информации.

Для энергосистем и для других больших систем характерна вероятность их поведения. Как правило, это не стационарные случайные процессы, а в большинстве случаев стохастические.

Рассмотрим простейший пример для энергосистем, когда целевая функция и различные функции ее параметров однозначно определены. Производим поиск оптимальных планов на множестве планов $U_i (i=1, 2, \dots, n)$.

Каждый такой план характеризуется параметром $X_j (j=1, 2, \dots, m)$, X_j принимает любое значение с вероятностью P_j .

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1$$

Z_{ij} – приведенные затраты для каждого плана U_i и параметра X_j .

Для стохастических процессов математическое ожидание приведенных затрат:

$$M Z_i(U_i) = \sum_{j=1}^m P_j Z_{ij}(x_j). \quad (20)$$

Оптимальное значение приведенных затрат:

$$M Z_{on} = \min Z_i(U_i). \quad (21)$$

Если оптимизация выполнена, например, по 2м главным параметрам (X_{j1} , X_{k2} - параметры), то с учетом вероятностей P_j и P_k мы получим математическое ожидание:

$$M Z_i(U_i) = \sum_i \sum_j P_j P_k Z_{ijk}(x_{j1}, x_{k2}) \quad (22)$$

Выводы

Такой подход плодотворен, если процесс стохастический; для больших слабо-структурируемых систем, поведение которых индетерминировано, составление оптимальных планов, которые учитывают максимальные нагрузки и максимальные потери в определенные периоды может привести к большим погрешностям.

Оптимизация таких систем (большие энергетические системы) учитывает неопределенность или неполноту информации и может быть выполнена с помощью неформальных решений с применением теории игр.

Литература

1. Данилов В. Лекции по теории игр. //Данилов В.: Российская экономическая школа, 2002. – 140с.
2. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Ершевич В.В. и др. Прогнозирование развития сложных систем. – М.: МЭИ, 1985. – 226с.
3. Колчанов А.Р. Основные разделы современной теории автоматического управления: Электронный конспект лекций. – Ивановский государственный энергетический университет: Электронная библиотека ИГЭУ. <http://elib.ispu.ru/library/lessons/kolganov2/>
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Спб.: Профессия, 2004. – 749 с.
5. [ru.wikipedia.org>wiki](http://ru.wikipedia.org/wiki)

References

1. Danilov V. Lekcii po teorii igr. //Danilov V.: Rossijskaja jekonomicheskaja shkola, 2002. – 140s.
2. Astahov Ju.N., Venikov V.A., Ershevich V.V. i dr. Prognozirovanie razvitiija slozhnyh sistem. – М.: MJeI, 1985. – 226s.
3. Kolchanov A.R. Osnovnye razdely sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Jelektronnyj konspekt lekcij. – Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet: Jelektronnaja biblioteka IGJeU. <http://elib.ispu.ru/library/lessons/kolganov2/>
4. Besekerskij V.A. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija / V.A. Besekerskij, E.P. Popov. – Spb.: Professija, 2004. – 749 s.
5. [ru.wikipedia.org>wiki](http://ru.wikipedia.org/wiki)

Б.М. Локотош, Л.В. Капуста

Використання стратегії теорії ігор при плануванні роботи великих енергосистем

Стаття присвячена можливості використання стратегії теорії ігор в ситуаціях, що володіють неповнотою інформації, наприклад, при розробці прогнозів для оптимального тестування роботи великих енергосистем.

Ключові слова: теорія ігор, стратегія, умови невизначеності, матриця, енергосистема.

B.N. Lokotosh, L.V. Kapusta

Application of strategy of game theory at planning of work of large grids

The article is devoted possibility of application of game theory in situations, possessing incompleteness of information, for example, at development of prognoses for the optimum testing of work of large grids.

Key words: game theory, strategy, terms of vagueness, matrix, grid.

Локотош Борис Николаевич

– профессор кафедры компьютерных наук Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Капуста Леонид Владимирович – к.т.н., доцент кафедры компьютерных наук Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: *Ульшин В.А.*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой системной инженерии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 574.2.57.03

В.Н. Малеткин, В.В. Некрутенко, И.Е. Голяев

г. Луганск

БИОФИЗИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ НА ЧЕЛОВЕКА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В статье проведен анализ влияния электромагнитных полей (ЭМП) природного и техногенного происхождения на жизнедеятельность человека, его здоровье и работоспособность. Ист. 8.

Ключевые слова: Электромагнитные поля, интенсивность ЭМП, электромагнитные процессы, функциональные системы организма, жизнедеятельность.

Постановка проблемы. Электромагнитное поле – особая форма материи, количественными характеристиками которого в среде являются напряженность электрического поля E , электрическая индукция D , магнитная индукция B , напряженность магнитного поля A . Проблема защиты человечества от действий электромагнитных излучений (ЭМИ) в настоящее время приобретает все более важное значение, т.к. растет число и мощность источников ЭМИ.

Анализ исследований и публикаций. Внешние ЭМП (общий электромагнитный фон Планеты), фиксируемые приборами, можно разделить на три категории – природные, антропогенного происхождения и биологической породы.

Природными источниками внешних ЭМП являются поле Земли (постоянное электрическое и геомагнитное); излучения, приходящее на Землю из Космоса; радиоволны, генерируемые процессами, происходящими на Земле (разряды молний, процессы, происходящие в ионосфере Земли и пр.) [1]. Спектр радиоизлучения Солнца и галактик занимает область примерно от 10 МГц до 10 ГГц. Большинство изменений в конкретных участках электромагнитного спектра поля Земли связано с активностью Солнца. В спокойном состоянии интенсивность солнечного излучения находится в пределах от 10^{-10} до 10^{-8} Вт/м² [2]. Значительная часть солнечных излучений приходится на оптический диапазон спектра и вносит основной вклад в суммарную энергию ЭМП, поступающую на Землю.

Электрическое поле Планеты направлено нормально к земной поверхности, заряженной отрицательно относительно верхних слоев атмосферы, создается избыточным зарядом на ее поверхности. Напряженность электрического поля у поверхности земли $E_{зем}$ находится в пределах 100 – 250 В/м, убывая с высотой по экспоненциальному закону. Разряды молний могут увеличивать напряженность этого поля до десятков кВ/м.

Геомагнитное поле Земли состоит на 99% из постоянного магнитного поля напряженностью от 33,4 до 55,7 А/м и переменного (с амплитудой в сотые доли А/м), порождаемого процессами в магнитосфере и ионосфере Земли [2]. Магнитные бури могут многократно увеличивать амплитуду этой составляющей геомагнитного поля. Фоновое электрическое поле Земли обладает напряженностью в среднем 130 В/м, а магнитное поле – 19,9...47,3 А/м [2].

Антропогенные источники ЭМП, созданные человеком, генерируют крайне низкие и сверхнизкие частоты до 3 кГц (линии электропередач, трансформаторные подстанции, транспорт на электроприводе и т.д.) а также излучения радиочастотного диапазона от 3 кГц до 300 ГГц (функциональные передающие устройства, бытовое оборудование, телевизоры, мониторы ПК и пр.).

К излучению биологической природы относят ЭМП, обусловленные процессами обеспечения жизнедеятельности организмов и др. биообъектов [2].

Электромагнитные процессы играют решающую роль в обеспечении нормальной жизнедеятельности организма. Более 100 лет назад естествоиспытатель Трандо установил, что в магнитном поле все химические реакции, в том числе и в живых организмах, протекают с иной скоростью, чем в вакууме [3]. В 30-е годы 20 века немецкий физик В.Шуман сделал открытие, что флуктуации геомагнитного поля Земли с резонансами на частотах 7,8; 14,1; 20,3; 24,6 Гц практически резонируют с частотами альфа и бета-ритмов головного мозга [4]. Позднее доктор Б.Браун в своих исследованиях доказал, что глубинные уровни релаксации тела и сознания человека связаны, прежде всего, с наиболее интенсивными по амплитуде альфа – ритмами [4]. Влиянием космических полей естественного происхождения на организм человека занимался основоположник гелиобиологии российский биофизик А.Л. Чижевский. Именно он впервые сформулировал закон о наличии связи между функциональным состоянием нервной системы у всех людей на Земле и изменением космического фона.

В 60-е годы XX века учеными Ленинградского института гигиены труда была выявлена устойчивая корреляция между временем нахождения персонала, обслуживающего высоковольтные электрические подстанции и другие мощные электроэнергетические установки и рядом неврологических нарушений организма [5].

Современный человек, как и все биологические объекты Природы, подвергается мощному воздействию искусственных электромагнитных полей. Их появление усилило фоновое излучение и превратило ЭМП в опасный экологический фактор для людей, работающих с источниками данных ЭМП, а также для населения, проживающего вблизи источников промышленных ЭМП или пользующегося электробытовой техникой.

Заданные природой частоты человека (в частности, 7,8 и 14,1 Гц) постоянно испытывают давление со стороны «электромагнитного смога» [6]. Наступает дисбаланс, происходит рассогласование функциональных систем организма, которые в естественной среде обитания должны работать по заданной программе [6]. Пропорционально растет число тех людей, у которых появляются проблемы со здоровьем, связанным с воздействием электромагнитных излучений. Данная проблема привела к необходимости постановки и решения одной из актуальных задач – защиты человека от электромагнитных воздействий.

Постановка задачи. Выполненный анализ состояния вопроса указывает на его актуальность, а также на то обстоятельство, что современный человек не может не реагировать на электромагнитные излучения. В отличие от других факторов окружающей среды, «электромагнетизм» используется в производстве и быту, и его невозможно пока заменить на что-либо другое, менее вредное. Электромагнитные поля присутствуют по-

вседневно и повсюду в жизни современного человека, то вполне правомочна постановка вопроса об обеспечении безопасных условий жизни и деятельности человека.

Материалы и результаты исследования. Электромагнитная среда обитания фактически может быть рассмотрена как источник помех в отношении жизнедеятельности человека и биоэкосистем. При взаимодействии ЭМИ с человеком поглощается лишь часть энергии, которая и может вызвать изменения в тканях или органах человека. Это взаимодействие носит биофизический характер. Характерной формой взаимодействия ЭМП с живым организмом является сочетание нагрева ткани, зависящего от поглощенной тканями энергии, и информационного акта, определяющего нетепловое воздействие на организм [2].

Организм человека высокочувствителен к воздействию различных типов внешних полей. Условия воздействия ЭМИ разнообразны: непрерывное и прерывистое, общее и местное, комбинированное от нескольких источников и сочетание с другими неблагоприятными факторами среды.

Длительное воздействие ЭМИ заметно сказывается на самочувствии и здоровье людей. ЭМИ с плотностью потока в 1 мВт/см^2 вызывают четко выраженное изменение биоэлектрической активности мозга практически у всех людей Планеты. Малые внешние магнитные поля с индукцией, равной $0,1 \dots 0,3 \text{ мкТл}$ приводят к заметным изменениям участков электрокардиограммы человека (ЭКГ), отвечающих одному сердечному циклу [7]. Изменения ЭКГ возникают одновременно с включением поля и исчезают с его выключением, т.е. в основе эффекта лежат быстрые изменения физических характеристик каких-то компонентов сердечно-сосудистой системы, а не биохимические изменения тканей сердца. Воздействие мощных электромагнитных полей на человека приводит к определенным сдвигам в нервно-психической и физиологической деятельности, однако «многоступенчатая» система защиты организма от вредных сигналов, осуществляемая на всех уровнях – от молекулярных до системного, – в значительной степени снижает вредность действия «случайных» для организма потоков информации. Если и наблюдается определенная реакция на эти поля, то очень часто при уровнях, значительно ниже тех, которые необходимы для возникновения энергетического воздействия. При $E = 10^{-4} \text{ В/м}$ у человека наблюдается сосудистый условный рефлекс. Для клеток чувствительность оценивается величиной энергии $10^{-19} \text{ Дж/клетку}$, т.е. проявляется скорее раздражающий эффект воздействия электромагнитной энергии. С усложнением биологического вещества неизменно усложняется процесс его взаимодействия с ЭМП: повышается чувствительность нервных клеток к ЭМП; «упорядочиваются» колебания ионов под воздействием поля, что приводит к изменению характера и величины чувствительности рецепторов; увеличивается влияние ЭМП на собственные частоты организма.

С развитием и усложнением организма все большее влияние на организм в целом оказывают влияние вторичные эффекты воздействия ЭМП, которые происходят, как правило, на дотепловых энергиях (кумуляция, стимуляция, сенсбилизация), возникающие как следствие способности сложных систем накапливать тепловое и информационное воздействие. Ккумуляция приводит к накоплению суммарного эффекта при воздействии ЭМП и увеличению общего времени облучения. Сенсбилизация заключается в повышении чувствительности организма после слабого радиооблучения к последующим воздействиям к более мощным вблизи летального порога. Изменения, вызываемые ЭМИ даже малых интенсивностей способны накапливаться в организме в условиях их длительного многолетнего воздействия. Изменения происходят не сразу, а по прошествии некоторого времени. В результате возможно развитие таких последствий, как лейкоз, опухоли мозга, гормональные заболевания. Имеются данные, что изменения в поведении человека. Потеря памяти, болезни Паркинсона и Альцгеймера, СПИД, синдром внезапной смерти внешне здорового ребенка, рост числа самоубийств, напрямую связаны с воздействием ЭМП.

Анализ [2,4,7,8] свидетельствует о многочисленных объективных жалобах пользователей ПК на ухудшение здоровья (костно-мышечные кожные, аллергические, ухуд-

шение функционирующего зрения), т.к. пользователь видеодисплейного терминала постоянно находится в ЭМП широкого диапазона частот (от 3 Гц до 300 МГц).

Некоторые данные о воздействии ЭМИ на человека, расположенные по шкале интенсивностей:

- при ППЭ равном 0,5-1 Мв/см² снижается кровяное давление, учащается пульс, снижается офтальмотонус;

- при ППЭ равном 10 Мв/см² происходит изменение рефлекторной деятельности. Наблюдаются морфологические изменения в коре головного мозга;

- при ППЭ равном 100 Мв/см² наблюдается стойкая гипотония;

- при ППЭ, Мв/см² равном $5 \cdot 10^2 \dots 8 \cdot 10^2$ проявляются болевые ощущения.

Выводы. В результате исследования получены неопровержимые данные о негативном влиянии ЭМИ на организм человека.

Л и т е р а т у р а

1. Грибан В.Г. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид. // В.Г. Грибан, О.В. Негоденко – К.: Центр учбової літератури, 2011. – 280 с.

2. Гордиенко В.А. Физические поля и безопасность жизнедеятельности. Навч. посіб. // В.А.Гордиенко – М.: Профиздат, 2006. – 316 с.

3. Даманский Ю.Д. Влияние электромагнитных полей радиочастот на человека. // Ю.Д. Даманский, А.М. Сердюк, Ч.П. Лось. – К.: Здоровье, 1975. – 205 с.

4. Исаев Л.К. Воздействие на организм человека опасных и вредных экологических факторов. // Л.К. Исаев – М.: ПАИМАС, 1997. – 512 с.

5. Красногорская Н.В. Электромагнитные поля в биосфере. // Н.В. Красногорская – М.: Наука, 1984. – 375 с.

6. Владимирский Б.М. Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. // Б.М. Владимирский – М.: Наука, 1971. – 142 с.

7. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий. // А.Н. Кузнецов – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 254 с.

8. Грачов Н.Н. Защита человека от опасных излучений // Н.Н. Грачов, Л.О. Мырова – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 317 с.

R e f e r e n c e s

1. Griban V.G. Ohorona praci. Navch. posib. 2-ge vid. // V.G. Griban, O.V. Negodenko – K.: Centr uchbovoi literaturi, 2011. – 280 s.

2. Gordienko V.A. Fizicheskie polja i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. Navch. posib. // V.A.Gordienko – M.: Profizdat, 2006. – 316 s.

3. Damanskij Ju.D. Vlijanie jelektromagnitnyh polej radiochastot na cheloveka. // Ju.D. Damanskij, A.M. Serdjuk, Ch.P. Los'. – K.: Zdorov'e, 1975. – 205 s.

4. Isaev L.K. Vozdejstvie na organizm cheloveka opasnyh i vrednyh jekologicheskikh faktorov. // L.K. Isaev – M.: PAIMAS, 1997. – 512 s.

5. Krasnogorskaja N.V. Jelektromagnitnye polja v biosfere. // N.V. Krasnogorskaja – M.: Nauka, 1984. – 375 s.

6. Vladimirskij B.M. Vlijanie solnečnoj aktivnosti na atmosferu i biosferu Zemli. // B.M. Vladimirskij – M.: Nauka, 1971. – 142 s.

7. Kuznecov A.N. Biofizika jelektromagnitnyh vozdejstvij. // A.N. Kuznecov – M.: Jenergoatomizdat, 1994. – 254 s.

8. Grachov N.N. Zawita cheloveka ot opasnyh izluchenij // N.N. Grachov, L.O. Myrova – M.: BINOM. Laboratorija znaniy, 2005. – 317 s.

Мальоткін В.М., Некрутенко В.В., Голяєв І.Є.

Біофізика впливу електромагнітних полів Землі на людину з погляду безпеки життєдіяльності

У статті проведено аналіз впливу електромагнітних полів (ЕМП) природного та техногенного походження на життєдіяльність людини, її здоров'я і працездатність. Дж. 8.

Ключові слова: електромагнітні поля, інтенсивність ЕМП, електромагнітні процеси, функціональні системи організму, життєдіяльність.

Maletkin V.M., Nekrutenko V.V., Golyaev I.E.

Biophysics of the influence by electromagnetic flap of the land on person with standpoint of safety to vital activity

In article is organized analysis of the influence by electromagnetic flap (EMF) natural and technical origins on vital activity of the person, his(its) health and capacity to work. Source. 8.

Малеткин В.Н. – доцент кафедры «Охрана труда и БЖД» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Некрутенко В.В. – преподаватель кафедры «Охрана труда и БЖД» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Голяев И.Е. – старший преподаватель кафедры «Охрана труда и БЖД» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Пительгузов Н.А., к.т.н., проф. Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 629.4.015

Д.Н. Марченко, А.В. Бойко, Н.В. Клипаков

г. Луганск

УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ В СИСТЕМЕ «ЭКИПАЖ - ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД – РЕЛЬСОВЫЙ ПУТЬ»

Проведено теоретическое исследование основных закономерностей формирования хаотических структур в процессе развития нестационарных динамических режимов на примере анализа ускорений вертикальных перемещений тягового электродвигателя. Предложен модифицированный метод реконструкции инвариантных характеристик временного ряда на основе вычисления локального показателя индекса повреждаемости. Продемонстрирована возможность эффективного применения локального показателя в задаче идентификации обнаружения переходного режима, развивающегося вследствие коллективных пространственных эффектов самоорганизации области трибоконтакта.

Ключевые слова: динамический хаос, тяговый привод, локомотив, нестационарные динамические режимы.

Как показывают результаты многих исследований [1, 3], процессы боксования локомотивов вызывают весьма существенные негативные последствия для подвижного состава. К ним можно отнести: 1) снижение на 15-25% тягово-сцепных качеств локомотивов; 2) существенное возрастание на 8-18% топливно-энергетических затрат из-за необходимости сброса и последующего восстановления тяговых или тормозных моментов электродвигателей при боксовании или юзе колесных пар; 3) повышение до 25-30% эксплуатационных затрат, связанных с ремонтом и поддержанием требуемого технического состояния узлов колесно-моторных блоков (тяговых электродвигателей, редукторов, колесных пар) и обусловленных высокими динамическими нагрузками в указанных узлах вследствие развивающихся при боксовании и юзе фрикционных автоколебаний в тяговых электроприводах [1]; 4) повышенный износ колесных пар и рельсов, интенсивность которого пропорциональна квадрату реализуемого относительного проскальзывания колесных пар ε ($\varepsilon = 1,5 - 30\%$). Среди перечисленных негативных факторов наиболее опасным является развитие фрикционных автоколебаний в элементах тяговых приводов и экипажной части локомотивов.

Для обнаружения боксования разработано множество систем, в зависимости от принципа действия их можно разделить на следующие 5 групп [3]:

- системы, основанные на измерении и последующем сравнении скорости вращения непосредственно боксующей и небоксующей колесных пар или производной от разности указанных скоростей;

- системы, основанные на измерении и последующем сравнении токов (напряжений) ТЭД или производных от разности указанных величин боксующих и небоксующих колесных пар;

- системы, основанные на измерении и последующем анализе изменения одновременно двух параметров скоростей вращения (скольжения) колесных пар или зависящих от них напряжений и - тягового момента (тока якоря) или производных от изменения указанных величин;

- системы с радарным или магнитометрическим устройством для измерения абсолютной скорости движения локомотива и сравнения с ней посредством бортового компьютера абсолютных скоростей на ободу колес каждой колесной пары замеряемых посредством датчиков оборотов и устройств, фиксирующих мгновенные диаметры колес по кругу катания;

- системы, основанные на анализе динамических процессов в тяговых приводах при реализации предельных сил сцепления.

Наиболее эффективными являются системы, основанные на анализе динамических процессов, которые получили название микропроцессорных систем обнаружения предельных сил сцепления и предупреждения боксования. Для их настройки и реализации, рассматривается расчетная схема (например рис. 1 [4]) и соответствующая ей математическая модель. На рис. 1 приведена расчетная схема для тягового привода 1-го класса с двухсторонней передачей тягового момента, которая описывает тяговый привод указанного локомотива.

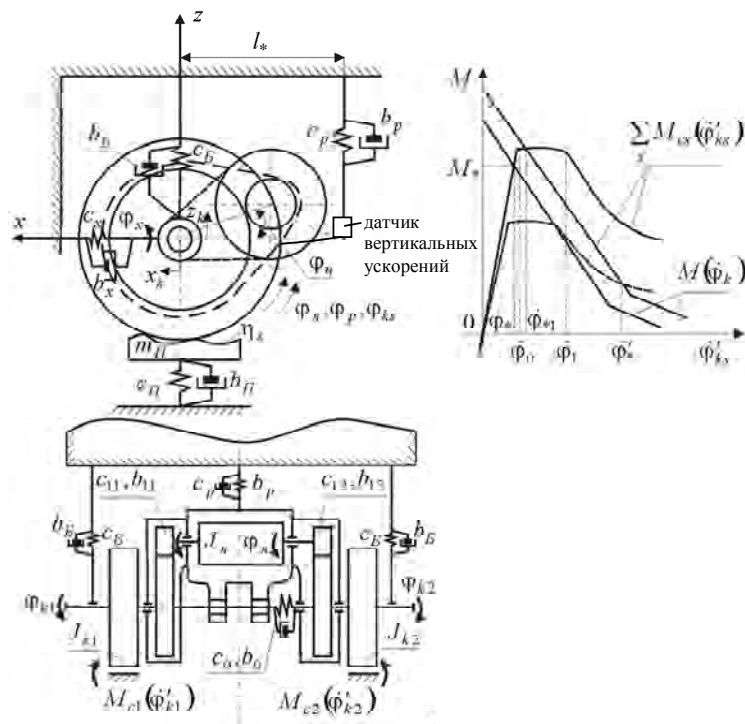


Рис. 1. Расчетная схема оценки динамических и тяговых качеств систем «Экипаж - тяговый электропривод – рельсовый путь» грузовых электровозов

Однако применение современных методов нелинейной динамики позволяет осуществить принципиально новый подход к обнаружению боксования, который базируется на исследовании временного ряда эмиссионных последовательностей.

Условно развитие фрикционных автоколебаний происходит в три этапа:

- а) отсутствие фрикционных автоколебаний;
- б) переходной процесс;
- в) квазистационарный режим автоколебаний.

На первом этапе локомотив движется в режиме тяги при устойчивом сцеплении колеса с рельсом. Этот режим характеризуется исключительно хаотичными колебательными процессами, вызываемыми неровностями рельсового пути. Затем происходит либо наезд на масляное пятно, либо резкий набор позиций контролера машиниста, в результате чего точка пересечения тяговой характеристики двигателя и суммарной кривой сцепления (см. рис. 1) оказывается на падающем участке, который соответствует режиму боксования. В этом случае начинается переходной процесс развития фрикционных автоколебаний, который затем переходит в квазистационарный режим.

В [5] доказано, что почти для всех гладких динамических систем по имеющейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной можно сконструировать новый аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у исходного.

Пусть имеется временной ряд экспериментальных данных, представляющий собой отсчеты некоторой физической величины: $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$. Если известен шаг по времени Δt , то время $t = k \cdot \Delta t$. Предполагается, что физическая величина является одной из переменных динамической системы. Система находится в стационарном режиме, т.е. фазовая траектория проходит внутри аттрактора. Для восстановления аттрактора Такенсом предложен метод временной задержки координат. В n -мерном фазовом пространстве строится последовательность точек вида:

$$x_k = \left(s_k, s_{k+\tau}, \dots, s_{k+(n-1)\tau} \right), \quad (1)$$
$$k = 0, m-1, \quad m = M - (n-1)\tau.$$

Здесь τ - временная задержка, n - размерность вложения.

Основной результат Такенса состоит в следующем. Если $M \rightarrow \infty$, то множество точек $x_k \in R^n$ задает вложение исходного аттрактора почти при любом выборе наблюдаемой переменной, если n не меньше удвоенной размерности исходного аттрактора. Для оценки характеристик реального исследуемого аттрактора можно вычислять характеристики восстановленного аттрактора. С целью уменьшения ошибки, обусловленной конечностью набора экспериментальных точек $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$, необходимо проводить расчеты при нескольких различных значениях M и n , и добиваться независимости получаемых оценок характеристик от M и n в пределах заданной точности.

Для малых шагов по времени Δt значения s_k и s_{k+1} будут близкими, поэтому большое значение приобретает правильный выбор временной задержки τ . Необходимо стремиться выбрать τ так, чтобы корреляция между s_k и $s_{k+\tau}$ была по возможности минимальной. Традиционный способ выбора временной задержки состоит в вычислении автокорреляционной функции временного ряда:

$$B(\tau) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} (s_k - \bar{s})(s_{k+\tau} - \bar{s}), \quad m = M - \tau. \quad (2)$$

Задержка τ выбирается равной времени первого пересечения нуля автокорреляционной функции. Второй способ требует вычисления спектра мощности временного ряда, т.е. быстрого преобразования Фурье автокорреляционной функции. Если в спектре мощности присутствуют кратные пики, то задержка τ выбирается равной четверти периода самой высокой из доминирующих частот. Третий способ [5] основан на вычислении средней взаимной информации между двумя измерениями. Пусть даны два множества измерений A и B . Взаимная информация между элементом a_i множества A и

элементом b_j множества B определяется как количество информации, которое имеют измерения a_i и b_j по отношению друг к другу:

$$I_{a_i, b_j} = \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right]. \quad (3)$$

Если измерения независимы, то взаимная информация равна нулю. Усредняя по всем измерениям, получаем:

$$I_{AB} = \sum_{a_i, b_j} P_{AB}(a_i, b_j) \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right]. \quad (4)$$

Заменяя a_i и b_j на s_k и $s_{k+\tau}$ соответственно, получаем среднюю взаимную информацию как функцию временной задержки τ . Задержка τ выбирается равной времени первого минимума во взаимной информации.

В случае модельных данных, когда нам известна размерность n фазового пространства динамической системы и все n координат каждой точки на аттракторе, корреляционную размерность D_2 аттрактора находят следующим образом [5]. Рассмотрим корреляционный интеграл $C(r)$, показывающий относительное число пар точек аттрактора, находящихся на расстоянии, не большем r :

$$C(r) = \frac{1}{m(m-1)/2} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=j+1}^{m-1} \theta(r - \rho(x_i, x_j)), \quad (5)$$

здесь θ - функция Хевисайда: $\theta(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha \geq 0, \\ 0, & \alpha < 0, \end{cases}$

ρ - расстояние в n -мерном фазовом пространстве, m - число точек x_i на аттракторе.

Если выполняется условие

$$C(r) \sim r^{D_2}, \quad (6)$$

то D_2 считают корреляционной размерностью аттрактора. Справедливость приведенного степенного закона ограничена значениями r , достаточно малыми по сравнению с размером аттрактора. При увеличении r величина $C(r)$ достигает насыщения $C(r) \rightarrow 1$ (при r , сравнимых с размером аттрактора). С другой стороны, при очень малых значениях r число пар точек (x_i, x_j) , расстояние между которыми не превышает r , становится малым (из-за конечности числа точек на аттракторе) и статистика становится бедной. Кроме того, приобретает решающее значение влияние инструментальных ошибок измерения сигнала. Следовательно, на практике степенной закон выполняется только в ограниченном диапазоне значений r (скейлинговом диапазоне), который и может быть использован для определения размерности аттрактора.

Учитывая, что из (7) следует

$$\ln C(r) \sim D_2 \ln r, \quad (7)$$

получаем оценку размерности аттрактора как тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей график корреляционного интеграла $C(r)$ в двойном логарифмическом масштабе. В случае экспериментальных данных мы обычно не знаем размерность фазового пространства системы и располагаем информацией только об одной координате точек на аттракторе. Поэтому все расчеты проводятся для нескольких размерностей фазового пространства $n = 1, 2, 3, \dots$. Для восстановления аттрактора используется метод Такенса.

При этом корреляционная размерность аттрактора $D_2(n)$ сначала возрастает, но затем обычно выходит на постоянный уровень $D_2(n) \approx D_2$. Таким образом, получают искомым корреляционную размерность D_2 аттрактора и оценку размерности фазового пространства системы $n \leq 2D_2 + 1$. Если же выходной сигнал динамической системы сильно зашумлен, то размерность аттрактора постоянно растет.

В самом общем случае не известно никакой определенной модели. По одной наблюдаемой динамической переменной необходимо восстановить систему дифференциальных уравнений (СДУ) или дискретное отображение, которые управляют поведением данного временного ряда [7]. Обычно модель задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений $dx/dt = F(x)$, где x - точка в n -мерном фазовом пространстве. Затем $F(x)$ строится с помощью полиномов от фазовых переменных [6]. В этот способ могут быть добавлены различные усовершенствования, включающие использование разложения временного ряда по некоторой системе базисных функций для облегчения эффективного выбора полиномов для СДУ и фильтрации шума в данных [7]. Можно определять параметры динамической системы по экспериментальному временному ряду и предложенному виду СДУ.

В работе [2] приведены результаты натурных испытаний 4 электровозов постоянного тока ВЛ11М, осуществляющих поездную работу на участках Львовской железной дороги. Указанные результаты представляют собой осциллограммы вертикальных ускорений (\ddot{z}_D) корпуса ТЭД каждой колесной пары в точке крепления (см. рис. 1) узла подвески ТЭД к раме тележки в режимах боксования колесных пар.

На рис. 2 приведена осциллограмма вертикальных ускорений ТЭД 2-й колесной пары при натурных испытаниях электровоза ВЛ11М-156. На рис. 3, 4 приведены результаты численного исследования временных последовательностей сигнала.

На основе описанного выше математического аппарата была разработана программа расчета корреляционной размерности и размерности фазового пространства, с ее помощью также можно построить фазовое пространство.

Принципиальная возможность данного подхода основана на универсальности нелинейных явлений, связанных с перераспределением эффективной энергии между разномасштабными динамическими подсистемами.

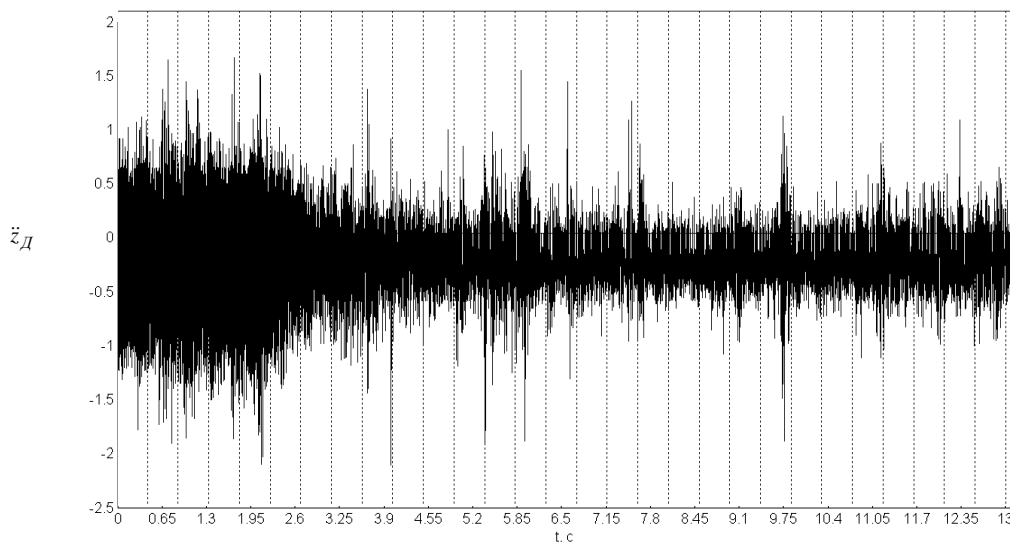


Рис. 2. Осциллограммы вертикальных ускорений ТЭД 2-й колесной пары при натурных испытаниях электровоза ВЛ11М-156 от 12.12.07 [2]

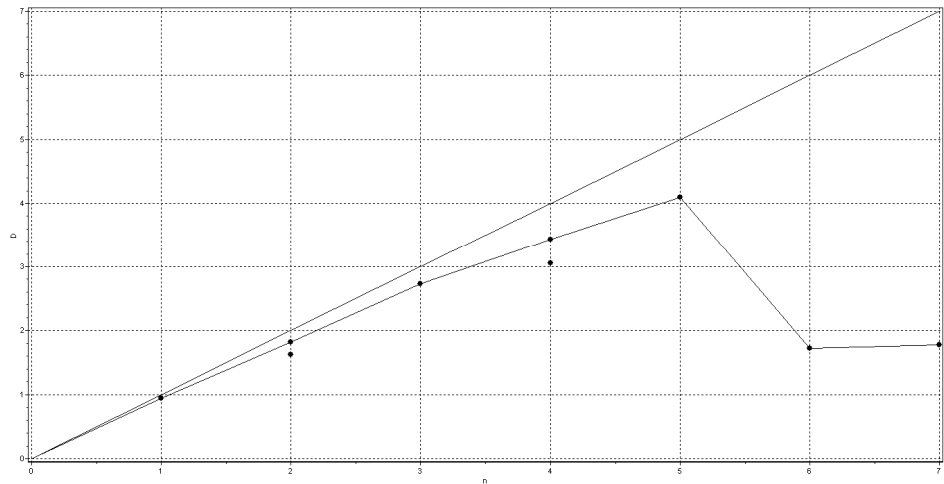


Рис. 3. Корреляционная размерность $D = 4.097$, размерность фазового пространства $n = 5$ (2-я колесная пара)

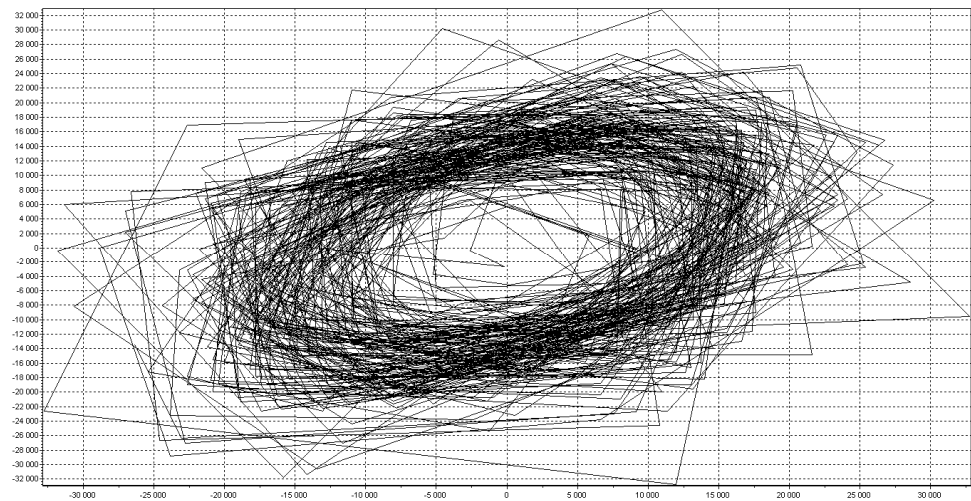


Рис. 4. Фазовое пространство (2-я колесная пара)

Выводы. Полученные результаты реализуют метод, основывающийся на новых методологических принципах идентификации, оценивания параметров и прогнозирования технического состояния системы на основе положений теории детерминированного хаоса. Вся выявляемая в методе “паспортная информация” естественным образом формирует единый информационный блок (совокупность параметров), определяемый как «информация динамических различий». Фактически при этом речь идет об обобщении К-энтропии Колмогорова – скорости потери информации, которая в теории детерминированного хаоса вводится как скаляр. Используемая логика введения “различимых признаков”, информация о которых может извлекаться на основе экспериментально измеряемых хаотических серий, и в силу этого составляет основу эмпирического знания о системе, в полной мере соответствует основным принципам синергетики.

В отличие от традиционных подходов исследования переходных нестационарных процессов эксплуатации ТЭД, предложено связать информационные свойства масштабного фактора, отображающего динамику системы в параметрах генерируемых

системой временных рядов эмиссионных последовательностей, с инвариантными параметрами хаотической динамики

Анализ данных испытаний [2] на основе предложенного алгоритма позволяет выявить нестационарный участок на графике реализации временных зависимостей вибрационных параметров ТЭД, связанный с неблагоприятными внешними влияющими факторами, и получить результат, который согласуется с известными способами контроля и управления режимами функционирования ТЭД.

Л и т е р а т у р а

1. Павленко А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
2. Киселев В.Н., Груник И.С., Байса В.В., Павленко А.П. Микропроцессорная система предупреждения буксования и юза для эксплуатируемых и перспективных локомотивов // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2008. – №5 (123) – Частина 2. – С. 152-160.
3. Осинковский О. Улучшение тягово-сцепных и эксплуатационных качеств тепловозов за счет совершенствования их противобоксочных систем: Дис. ... канд. техн. наук. – Луганск, 2007, - 202 с.
4. Снитко Н.П., Павленко А.П., Клипаков Н.В. Об особенностях развития фрикционных автоколебаний в системах «экипаж – тяговый электропривод – рельсовый путь» грузовых локомотивов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2010 – №5 (147). – Частина 1. – С. 107-115.
5. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1982. - 240с.
6. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. М.: ДМК Пресс, 2005. - 304с.
7. Дьяконов В. , Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. СПб.: Питер, 2002. - 608с.

R e f e r e n c e s

1. Pavlenko A.P. Dinamika t'jagovyh privodov magistral'nyh lokomotivov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 192 s.
2. Kiselev V.N., Grunik I.S., Bajsa V.V., Pavlenko A.P. Mikroprocessornaja sistema preduprezhdenija buksovanija i juza dlja jekspluatiruemyh i perspektivnyh lokomotivov // Visnik Shidnouk. nac. un-tu im. V. Dalja. – Lugans'k: Vid-vo SNU im. V. Dalja, 2008. – №5 (123) – Chastina 2. – S. 152-160.
3. Osinovskij O. Uluchshenie t'jagovo-scepnnyh i jekspluatacionnyh kachestv teplovozov za schet sovershenstvovanija ih protivoboksovochnykh sistem: Dis. ... kand. tehn. nauk. – Lugansk, 2007, - 202 s.
4. Snitko N.P., Pavlenko A.P., Klipakov N.V. Ob osobennostjah razvitija frikcionnyh avtokolebanij v sistemah «ekipazh – t'jagovyj jelektroprivod – rel'sovyj put'» gruzovyh lokomotivov // Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Dalja. – Lugans'k: Vid-vo SNU im. V. Dalja, 2010 – №5 (147). – Chastina 1. – S. 107-115.
5. Shuster G. Determinirovannyj haos. M.: Mir, 1982. - 240s.
6. Smolencev N. K. Osnovy teorii vejvletov. M.: DMK Press, 2005. - 304s.
7. D'jakonov V. , Abramenkova I. MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazhenij. SPb.: Piter, 2002. - 608s.

Д.М. Марченко, А.В. Бойко, Н.В. Клипаков

Управління нестационарними динамічними режимами в системі «Екіпаж - тяговий електропривод - рейковий шлях»

Проведено теоретичне дослідження основних закономірностей формування хаотичних структур в процесі розвитку нестационарних динамічних режимів на прикладі аналізу прискорень вертикальних переміщень тягового електродвигуна. Запропоновано модифікований метод реконструкції інваріантних характеристик часового ряду на основі обчислень локального показника індексу пошкодженості. Продемонстрована можливість ефективного застосування локального показника в задачі ідентифікації виявлення перехідного режиму, що розвивається внаслідок колективних просторових ефектів самоорганізації області трібоконтакта.

Ключові слова: динамічний хаос, тяговий привід, локомотив, нестационарні динамічні режими.

D.M. Marchenko, A.V. Boiko, M.V. Klipakov
Management of time-dependent dynamical regimes in the system "Vehicle – traction electric drive – rail track"

A theoretical study of the fundamental laws of formation chaotic structures in the development of nonstationary dynamical regimes of acceleration applied to the analysis of vertical displacements traction motor. The modified method of reconstructing the invariant characteristics of time series based on the calculation of the local index index of damage. Demonstrated the possibility of effective use of local indicators in the detection problem of identification of the transient regime, evolving as a result of collective self-organization of spatial effects tribokontakta.

Keywords: dynamic chaos, traction drive, engine, transient dynamic regimes.

Марченко Д.Н. – к.т.н., доцент кафедры железнодорожного транспорта Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Бойко А.В. – зав. отделением довузовской підготовки, профориентационной работы, трудоустройства и связей с выпускниками Политехнического коледжа ЛНАУ (г. Луганск);

Клипаков Н.В. – старший преподаватель кафедры прикладной математики Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Пожидаев В.Ф., д.т.н., проф., заведующий кафедрой информатики Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 621.833

П. Л. Носко, В.Е. Шисман, А.П. Карпов, Л.М. Чокнадий

г. Луганск

МОДЕЛЬ СОВМЕЩЕНИЯ СХВАТА МАНИПУЛЯТОРА С ОБЪЕКТОМ

Создана математическая модель для определения точности совмещения схвата манипулятора подъемно – транспортного робота с объектом подъема и транспортирования в заданную координату. При этом учитывается случайный характер погрешностей обобщенных координат. Рис. 1, истр. 3.

Создана математическая модель для определения точности совмещения схвата манипулятора подъемно-транспортного робота с объектом подъема и транспортирования в заданную координату. При этом учитывается случайный характер погрешностей обобщенных координат.

В конкретных условиях эксплуатации обобщенные координаты манипулятора обрабатываются с погрешностями. При этом погрешности имеют случайный характер с вероятностными характеристиками. В связи с этим, одной из наиболее важной подъемно-транспортной операцией является взятие произвольно ориентированным схватом манипулятора подъемно-транспортного робота (ПТР) объекта, который находится в неподвижной системе координат. В реальных условиях обобщенные координаты звена манипулятора (рис. 1) полностью определяют положение схвата. Однако, для того, чтобы произвольно ориентированным схватом ПТР взять объект, зафиксированного в неподвижной системе координат, необходимо иметь соответствующее программное и информационное обеспечение, учитывающее случайный характер погрешностей обработки обобщенных координат. С целью создания соответствующего программного обеспечения в настоящей работе разработана математическая модель определения действительного значения обобщенных координат.

Математически задача сводится к тому, что необходимо обеспечить совмещение единичных векторов \bar{N} и \bar{N}_0 . При этом вектор \bar{N} направлен по оси схвата и приложен в его центре (точка М), находящегося в подвижной системе координат $X_n Y_n Z_n$ п-

звенного манипулятора ПТР. Вектор же \bar{N}_0 задан в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$ и направлен по оси груза и приложенного в точке М (рис. 1,а).

Однако, учитывая наличие случайных погрешностей, действительные значения вектора обобщенных координат неизвестны. В результате этих погрешностей возникают: – линейные погрешности $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ смещения точки М вдоль соответствующих осей; – угловая погрешность (α) обработки программного значения вектора обобщенных координат, угла между векторами \bar{N} и \bar{N}_0 (рис. 1,а).

Рассмотрим n-звенный манипулятор (рис. 1, б). Пусть начало неподвижной системы координат совпадает с точкой О, где находится объект. Вектор \bar{N}_0 задан в неподвижной системе координат $\bar{N}_0 = \{N_0x_0; N_0y_0; N_0z_0\}$. Вектор \bar{N} задан в подвижной системе координат $X_nY_nZ_n$, будет $\bar{N}_0 = \{Nx_n; Ny_n; Nz_n\}$.

Матрица перехода, учитывающая угловое перемещение имеет вид:

$$M_{on} = \begin{vmatrix} \cos(q_1 + q_2 + \dots + q_n) & -\sin(q_1 + q_2 + \dots + q_n) & 0 \\ \sin(q_1 + q_2 + \dots + q_n) & \cos(q_1 + q_2 + \dots + q_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

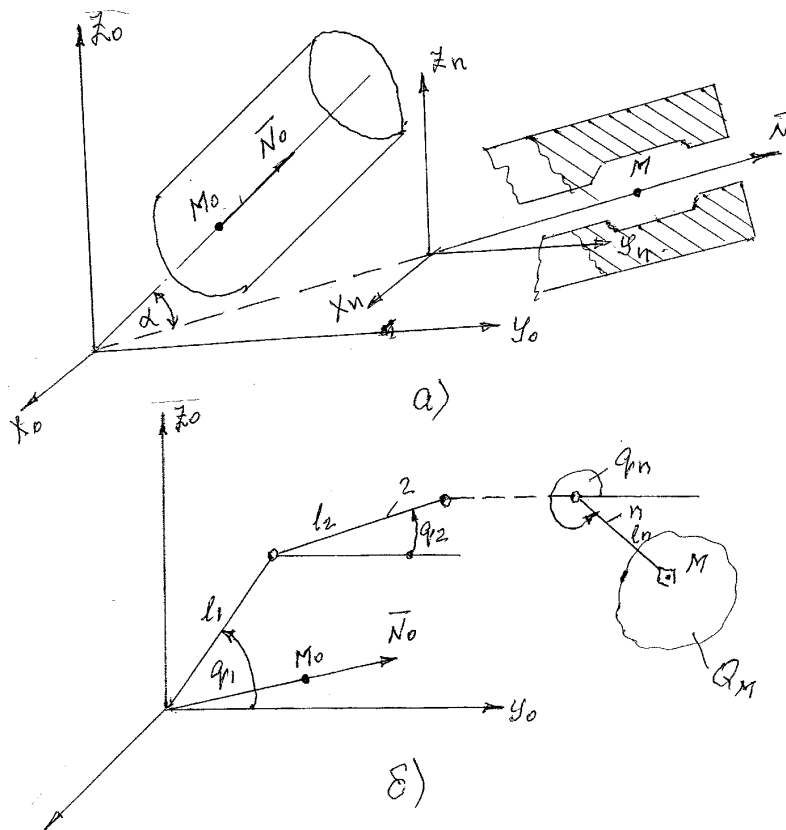


Рис. 1. Кинематическая схема n-звенного манипулятора ПТР

Величина угловой погрешности определяется так:

$$\alpha = \arccos(\bar{N}_0; M_{on}; \bar{N}) - \arccos[(N_{ox_0}N_{xn} + N_{oy_0}N_{yn}) \cos(q_1 + q_2 + \dots + q_n) + (N_{oy_0}N_{xn} + N_{ox_0}N_{yn}) \sin(q_1 + q_2 + \dots + q_n) + N_{oz_0}N_{zn}] - \arccos[A \cos(q_1 + q_2 + \dots + q_n - \gamma) + (2) + N_{oz}N_{zn}],$$

где $A = \sqrt{(1 - N_{ozo}^2)(1 - N_{zn}^2)} = |\bar{N}_{o(XoYo)}| \cdot |\bar{N}_{(XnYn)}|$; $\bar{N}_{o(XoYo)}$, $\bar{N}_{(XnYn)}$ – проекции векторов \bar{N}_o и \bar{N} на плоскости, соответственно X_0Y_0 и X_nY_n .

Угол между проекциями векторов и на плоскости и можно определить как:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{N_{oYo}N_{xn} - N_{oXo}N_{Yn}}{N_{oXo}N_{Xn} - N_{oYo}N_{Yn}}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что угол ϕ принимает вид:

$$\phi = \begin{cases} (\bar{N}_{(XoYo)}; \bar{N}_{XnYn}), & \text{если } \sin \phi \geq 0; \\ (-\bar{N}_{o(XoYo)}; \bar{N}_{XnYn}), & \text{если } \sin \phi < 0. \end{cases}$$

При взятии объекта схватом, введем область не совпадения векторов \bar{N} и \bar{N}_0 , которую обозначим Q_M . Эта область вызвана угловой погрешностью $\alpha(\bar{q})$ обобщенных координат и определяется неравенством:

$$\alpha(\bar{q}) = \arccos[A \cos(q_1 + q_2 + \dots + q_n - \phi) + N_{ozo}N_z] \leq \alpha_0. \quad (4)$$

Обозначив $Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n - \phi$, получим функцию вида:

$$\alpha(Q) = \arccos(A + N_{ozo}N_z) \leq \alpha \leq \alpha_{\max} = \arccos(-A + N_{ozo}N_z). \quad (5)$$

Исследуем функцию $\alpha(Q)$.

При этом $\alpha = \begin{cases} \alpha_{\min} \text{ при } Q - \gamma = 0; \\ \alpha_{\max} \text{ при } Q - \gamma = \pi. \end{cases}$

Решив неравенство (4), найдем область Q_M в явном виде:

$$Q_M = \left\{ \begin{array}{l} \bar{q}; Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n - \phi \in [-\arccos \frac{\cos \alpha_0 - N_{ozo}N_z}{A} + 2\pi d; \\ \arccos \frac{\cos \alpha_0 - N_{ozo}N_z}{A} + 2\pi k], k = 1, 2, \dots, n. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Пусть $\bar{q}_i = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – нормально распределенные случайные независимые величины с математическим ожиданием m_q и дисперсиями σ_q^2 . Тогда величина распределения по нормальному закону с параметрами:

$$m_q = \sum_{i=1}^n m_{qi} - \phi; \sigma_q^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{qi}^2.$$

Критерии точности манипулятора

$$P_M = \int_{Q_M} f(\bar{q}) d\bar{q} - \sum_{K=-\infty}^{\infty} P_K, \quad (7)$$

где P_K – вероятность попадания случайной величины q в область (6).

Оптимизируя критерия (7), найдем при фиксированных значениях σ_{qi} , величину m_{qi} , при которых вероятность достигает максимума.

Дифференцируя (7), получим

$$\frac{dP_M}{d\alpha_o} = \frac{1}{\sigma_q \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sin \alpha_o}{\sqrt{A^2 - (\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn})}} \times \sum_{K=-\infty}^{\infty} \ell \frac{(\arccos \frac{\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn}}{A} + 2\pi K - m)}{2\sigma_q^2} +$$

$$+ \ell - \frac{(\arccos \frac{\cos \alpha_o + N_{ozo} N_{zn}}{A} + 2\pi K - m_q)^2}{2\sigma_q^2}.$$

После преобразований

$$\frac{\partial P_M}{\partial d_o} = \frac{\sin \alpha_o}{\pi \sqrt{A^2 - (\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn})^2}} \left[1 + \sum_{K=1}^{\infty} \ell - \frac{K^2 \sigma_q^2}{2} \cdot \left[\cos K \left(m_q - \arccos \frac{\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn}}{A} \right) \right] \right].$$

Т.к. при $d_0 = d_{\min}$; $F(d_{\min}) = 0$, то

$$P_M = \int_{d_{\min}}^{d_o} \frac{\partial P_M}{\partial d_o} d\alpha_o = \frac{1}{\pi} \left[\arccos \frac{\cos \alpha_o + N_{ozo} N_{zn}}{A} + \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{K=1}^{\infty} \left(\ell - \frac{\sigma^2}{2} \right)^{K^2} \frac{\cos K m_q}{K} \sin K \left(\arccos \frac{\cos \alpha_o + N_{ozo} N_{zn}}{A} \right) \right].$$

Решение данного уравнения при $m_q = 0$. Следовательно, P_D имеет максимум с учетом $m_q = 0$ при любом значении $\alpha_o = [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, т.е. при любых m_{qi} , удовлетворяющих условию $\sum_{i=1}^n m_{oi} = \phi$. В этом случае, после соответствующих преобразований, получим:

$$S(\alpha_o) = \sum_{K=1}^{\infty} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\arccos \frac{\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn}}{A} + 2\pi K}{\sigma_q \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\arccos \frac{\cos \alpha_o - N_{ozo} N_{zn}}{A} + 2\pi K}{\phi(x)} \right) \right] \quad (8)$$

$$\leq \left[1 - \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{3\pi}{\sigma_q \sqrt{2}} + \operatorname{erf} \frac{\pi}{\sigma_q \sqrt{2}} \right) \right] + \frac{\sigma_q}{2} \left(\phi \left(\frac{\pi}{\sigma_q} \right) - \phi \left(\frac{3\pi}{\sigma_q} \right) \right),$$

где $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ – плотность нормального распределения.

Как показывают вычисления при $\sigma_q \leq 0,01$; $S(\alpha_o) \ll 2 \cdot 10^{-5}$, следовательно, в дальнейшем $S(\alpha_o)$ можно пренебречь. В этом случае зависимость (8) принимает вид:

$$P_M = \operatorname{erf} \left(\frac{\arccos \frac{\cos \alpha_0 - N_{ozo} N_{zn} + 2\pi K}{A}}{\sigma_q \sqrt{2}} \right). \quad (9)$$

Таким образом, задаваясь исходными данными N_{ozo} ; N_{zn} ; σ_{qi} ; α_0 , выбираем σ_q так, чтобы выполнялось неравенство:

$$P_M = \operatorname{erf} \left(\frac{\arccos \frac{\cos \alpha_0 - N_{ozo} N_{zn} + 2\pi K}{A}}{\sigma_q \sqrt{2}} \right) \geq P_0. \quad (10)$$

Определив σ_q , находим сочетание σ_{qi} , удовлетворяющее условию $\sum_{K=i}^n \sigma_{qi}^2 = \sigma_q^2$.

В связи с тем, что радиус-вектор точки M в системе координат связанного со схватом не является, в отличие от матрицы перехода, случайной величиной, то вероятность попадания в заданную область D полностью определяется вероятностью принадлежности матрицы перехода подмножеству D . Следовательно, за критерий точности позиционирования примем $P_D = P(M_n \in D)$ (11). Пусть f – отображение множества Q всевозможных векторов \bar{q} на множество

$$E_n \cdot f : Q \rightarrow E_n; E_n = f(Q); \bar{q} \in Q; M_{on} \in E_n. \quad (12)$$

Тогда, вероятность P_D равна вероятности попадания вектора \bar{q} на Q_D , являющегося прообразом множества D при отображении f :

$$P_D = P(Mn \in D) = P(\bar{q} \in D) = P(\bar{q} \in Q_D); f(Q_D) = D. \quad (13)$$

Задавшись законом распределения случайного вектора, можно найти:

$$P_D = \int_{Q_D} dF(\bar{q}) = \int_{Q_D} dF(\bar{q})dq, \quad (14)$$

где $F(\bar{q})$ – функция распределения случайного вектора \bar{q} ; $f(\bar{q})$ – плотность распределения случайного вектора \bar{q} .

Для ПТР особо важным является попадание центра схвата в пределы заданной области D . Допускаемое отклонение определяется границей области D , которая ограничивается размером $[E]$. Пусть положение $(\bar{r}_M^{(0)})$ центра схвата робота, а следовательно, и жестко связанного с ним груза, накладывается ограничение по отклонению действительного радиуса-вектора $\bar{r}_{Mq}^{(0)}$ от номинального положения $\bar{r}_{Mu}^{(0)}$ в пределах $[E]$. Т.е.

$$\bar{\rho}(\bar{r}_M^{(0)}; \Delta \bar{r}_M^{(0)}) \leq [E], \quad (15)$$

где $\Delta \bar{r}_M^{(0)} = \bar{r}_{Mq}^{(0)} - \bar{r}_{Mu}^{(0)}$ – расстояние от действительного положения радиус-вектора груза до его желаемого положения; $\rho = \max \Delta \bar{r}_M^{(0)}$ – максимальное значение $\Delta \bar{r}_M^{(0)}$. Очевидно, область D допустимого отклонения определится из условия:

$$(\bar{r}_{MX}^{(0)} - \Delta\bar{r}_{MX}^{(0)})^2 + (\bar{r}_{MY}^{(0)} - \Delta\bar{r}_{MY}^{(0)})^2 + (\bar{r}_{MZ}^{(0)} - \Delta\bar{r}_{MZ}^{(0)})^2 \leq [E]^2, \quad (16)$$

где $\bar{r}_{MX}^{(0)}$; $\bar{r}_{MY}^{(0)}$; $\bar{r}_{MZ}^{(0)}$; – проекции на соответствующие оси неподвижной системы координат $\Delta\bar{r}_{MX}^{(0)}$; $\Delta\bar{r}_{MY}^{(0)}$; $\Delta\bar{r}_{MZ}^{(0)}$ – проекции ошибки функции положения груза на соответствующие оси неподвижной системы координат.

Если в зависимости (16) учесть только знак равенства, то получим границу допустимой области. Следовательно, граница проекции области D на множество радиус-векторов \bar{r} является сфера с центром в точке M – центра схвата, полученной при обработке идеальных значений обобщенных координат и радиусом $[E]$.

В общем случае, в 3-х мерном пространстве на положение центра схвата, т.е. $\Delta\bar{r}_M^{(0)}$ наложено ограничение по отклонению от заданной точки M :

$$\Delta\bar{r}_M^{(0)}(\Delta r_{MX}^{(0)}; \Delta r_{MY}^{(0)}; \Delta r_{MZ}^{(0)}) \\ \rho(r_M^{(0)}; \Delta\bar{r}_M^{(0)}) \leq E. \quad (17)$$

Тогда область D определяется из условия:

$$(r_{MX}^{(0)} - \Delta r_{MX}^{(0)})^2 + (r_{MY}^{(0)} - \Delta r_{MY}^{(0)})^2 + (r_{MZ}^{(0)} - \Delta r_{MZ}^{(0)})^2 \leq E^2. \quad (18)$$

Граница области D определяется знаком равенства в (18):

$$(r_{MX}^{(0)} - \Delta r_{MX}^{(0)})^2 + (r_{MY}^{(0)} - \Delta r_{MY}^{(0)})^2 + (r_{MZ}^{(0)} - \Delta r_{MZ}^{(0)})^2 = E^2. \quad (19)$$

Таким образом, граница проекции области D на множество векторов \bar{r} является сферой с центром в точке M и радиусом E .

По данной математической модели определены допуски на погрешности обобщенных координат ПТР для приборостроения ПР – А1 [1], [3] и для кузнечно-прессовых операций [2].

Выводы. Разработана математическая модель для определения допусков на погрешности обобщенных координат манипулятора подъемно-транспортного робота, позволяющие обеспечить быстрое определение схватом робота координаты нахождения груза, для подъема и его транспортирования.

Л и т е р а т у р а

1. Шисман В.Е. Анализ и синтез допусков на погрешности элементов кинематических цепей промышленных роботов, применяемых в приборостроении // Тез. докл. Всесоюзной научно-техн. конф. «Технологические пути экономии трудовых и материальных ресурсов и интенсификации производства в приборостроении». – Суздаль, 1983. – С. 286-290.
2. Шисман В.Е. Определение допусков на погрешности промышленных роботов применяемых в КПП // Тезисы докл. Всесоюзной научно-техн. конф. «Инженерные проблемы автоматизации и улучшения условий труда в кузнечно-штамповочном производстве». – М, 1984. – С. 52-58.
3. Шисман В.Е. Точность роботов и робототехнических систем. – Харьков: Вища школа, 1988. – 154 с.

References

1. Shisman V.E. Analiz i sintez dopuskov na pogreshnosti jelementov kinematicheskikh cepej promyshlennyh robotov, primenjaemyh v priborostroenii // Tez. dokl. Vsesojuznoj nauchno-tehn. konf. «Tehnologicheskie puti jekonomii trudovyh i material'nyh resursov i intensifikacii proizvodstva v priborostroenii». – Suzdal', 1983. – S. 286-290.

2. Shisman V.E. Opredelenie dopuskov na pogreshnosti promyshlennyh robotov primenjaemyh v KShP // Tezisy dokl. Vsesojuznoj nauchno-tehn. konf. «Inzhenernye problemy avtomatizacii i uluchsheniya uslovij truda v kuznechno-shtampovochnom proizvodstve». – M, 1984. – S. 52-58.

3. Shisman V.E. Tochnost' robotov i robototekhnicheskikh sistem. – Har'kov: Viwa shkola, 1988. – 154 s.

Створено математичну модель для визначення точності суміщення схоплювання маніпулятора підйомно-транспортного робота з об'єктом підйому й транспортування в задану координату. При цьому враховується випадковий характер погрешностей узагальнених координат. Рис. 1, джер. 3.

A mathematical model for determination the accuracy of overlapping of manipulator's gripper pick-and-place robot with the object of lifting and transportation in the specified coordinate is built. This takes into account the random nature of the errors of generalized coordinate. Fig. 1, source. 3.

Носко Павло Леонідович – докт. техн. наук, професор, зав. кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Шисман Володимир Юхимович – канд. техн. наук, доцент кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Карпов Олексій Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Чокнадій Лідія Миронівна – асистент кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Утумов М.Л., докт. техн. наук, професор кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

УДК 519.61

Ю.И. Статывка, А.С. Тимошин

г. Луганск

НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ

В статье рассмотрены некоторые задачи компьютерной алгебры, связанные с матричными вычислениями и квадратичными формами. Реализация соответствующих алгоритмов предлагается в известной системе символьных вычислений Maxima.

Ключевые слова: компьютерная алгебра, система Maxima, алгоритм Барейса, преобразование Якоби.

Постановка проблемы. Современная компьютерная алгебра неразрывно связана с применением компьютерной вычислительной техники, и особенно с тем программным обеспечением, к которому относятся прикладные математические пакеты. К числу мощных профессиональных математических пакетов можно отнести такие пакеты как MatLab и Scilab. Существенная разница между этими пакетами состоит в том, что Scilab – программа с открытым исходным кодом, а MatLab таковой не является. Эти пакеты объединяет то, что они изначально тяготеют к выполнению численных расчетов. И хотя в MatLab включены многие средства символьных вычислений, все же наиболее эффективными современными системами аналитических вычислений, являются такие системы как Maple, Maxima, Mathematica. Например, система Maxima имеет современный пользовательский интерфейс, мощные средства визуализации всех этапов работы, большой набор функций и специальных пакетов. Однако, есть ряд задач, в частности вычисление определителя матрицы без использования дробей, изучение которой является достаточно важным как в теоретическом, так и в методическом аспекте.

Анализ последних исследований и публикаций. Алгоритмам компьютерной алгебры, связанным с матричным анализом, посвящено не так много литературы. Большая часть источников [1, 4, 5] по компьютерной алгебре содержит материал, относящийся к вопросам представления чисел, многочленов, рациональных и алгебраических функций, полиномиального упрощения, формального интегрирования. Различные операции именно с этими объектами предполагают символичные вычисления. В некоторой литературе под компьютерной алгеброй подразумевается область математики, лежащая на стыке алгебры и вычислительных методов. Действительно, есть множество задач алгебры и математического анализа, решение которых заключается не просто в получении численного результата. Непосредственный анализ некоторых вопросов, связанных с матрицами, и, в частности, особых алгоритмов вычисления определителей, представлен в [2].

Цель статьи. Исследовать алгоритм вычисления определителя матрицы без использования дробей, предложенный Барейсом, с последующей реализацией этого алгоритма в системе Maxima. Исследовать приведение квадратичной формы к каноническому виду методом унитарного преобразования.

Материалы и результаты исследования. Будем рассматривать так называемые *плотные* матрицы. Определение плотных матриц может быть дано через понятие *разреженных* матриц. Матрицу порядка n называют разреженной, если число ее ненулевых элементов не превышает величины n^{1+q} , где $q < 1$. Так разреженная матрица порядка 50 (при $q = 0,5$) содержит около 350 ненулевых элементов, что составляет небольшой процент от общего числа элементов матрицы. Теперь можно сказать, что плотные матрицы – это матрицы, которые не относятся к разреженным.

Одной из серьезных проблем в системах компьютерной алгебры является проблема деления, которая возникает, например, при вычислении определителей. Речь идет о том, что вычисление определителя матрицы, как суммы произведений элементов матрицы, взятых по одному из каждой строки и каждого столбца (этот способ вычисления определителя иногда называют правилом Крамера), очень неэффективно: вычислительная сложность правилом Крамера составляет $O(nn!)$. В то время как при вычислении определителей посредством алгоритма гауссова исключения, число операций составляет $O(n^3)$. Очевидно, что алгоритм гауссова исключения требует выполнения деления, что может приводить к дробям. Кроме того, для матриц с элементами из кольца с делителями нуля метод последовательного исключения может быть просто невыполнимым. Это может возникнуть в том случае, когда ни один из элементов матрицы не имеет делителей единицы.

Например, в кольце классов вычетов по модулю 6 определитель матрицы $\begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$ равен 1, однако элементы 4 и 3 в кольце Z_6 не имеют делителей единицы, что делает невозможным деление, т.е. применение алгоритма исключения.

Как отмечается в [2], существует целое семейство методов исключения без использования дробей, т.е. таких, где все необходимые деления выполняются точно. Рассмотрим более подробно *пошаговый* алгоритм вычисления определителей без использования дробей, предложенный Барейсом, который основан на обобщении тождества Сильвестра.

Введем некоторые обозначения. Пусть задана квадратная матрица $A = (a_{ij})$ порядка n , причем элементы матрицы – целые числа. Рассмотрим определитель следующего вида:

$$\Delta(k, i, j) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} & a_{kj} \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ik} & a_{ij} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Заметим, что определитель $\Delta(k, i, j)$ получен окаймлением i -й строкой и j -м столбцом левого верхнего углового (главного) минора Δ_k порядка k матрицы A , где $n \geq i, j > k$.

Основное соотношение пошагового алгоритма вычисления определителей без использования дробей следующее:

$$\Delta(k, i, j) = \frac{1}{\Delta(k-2, k-1, k-1)} \cdot \begin{vmatrix} \Delta(k-1, k, k) & \Delta(k-1, k, j) \\ \Delta(k-1, i, k) & \Delta(k-1, i, j) \end{vmatrix} \quad (2)$$

Очевидно, что значение определителя $\Delta(k, i, j)$ является целым числом (из формулы (1) его можно вычислить по правилу Крамера). Следовательно, правая часть формулы (2) – целое число, т.е. деление выполняется без остатка.

Это дает возможность вычислить определитель матрицы A пошаговым образом, причем промежуточные результаты есть целые числа. Согласно формуле (1) $\det(A) = \Delta(n-1, n, n)$. С другой стороны, согласно формуле (2),

$$\begin{aligned} \det(A) = \Delta(n-1, n, n) &= \\ &= \frac{1}{\Delta(n-2, n-1, n-1)} \cdot \begin{vmatrix} \Delta(n-2, n-1, n-1) & \Delta(n-2, n-1, n) \\ \Delta(n-2, n, n-1) & \Delta(n-2, n, n) \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Мы имеем дело с рекурсивным алгоритмом, который в системе *Matha* может быть реализован следующим образом:

```
determ[n, i, j] :=
  if n=1 then A[n, n]*A[i, j]-A[i, n]*A[n, j] else
  if n=2 then (1/A[n-1, n-1])*(determ[n-1, n, n]*
determ[n-1, i, j]-determ[n-1, n, j]*determ[n-1, i, n]) else
  (1/determ[n-2, n-1, n-1])*(determ[n-1, n, n]*
determ[n-1, i, j]-determ[n-1, n, j]*determ[n-1, i, n])$
```

Данный алгоритм относится к алгоритмам исключения элементов матрицы. Действительно, рассмотрим произвольную символьную квадратную матрицу:

$$A = ([a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots], [a_{21}, a_{22}, a_{23}, \dots], [a_{31}, a_{32}, a_{33}, \dots], \dots).$$

Выполним над матрицей следующие элементарные преобразования строк (как правило, такие преобразования проводят при приведении матрицы к ступенчатому виду для вычисления ранга матрицы или решения системы линейных уравнений). Умножим первую строку матрицы на элемент a_{21} , а вторую строку – на элемент $(-a_{11})$, и затем прибавим ко второй строке первую. Вторая строка примет вид:

$$[0, a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}, a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}, \dots].$$

Полученная вторая строка в обозначениях формулы (1) может быть переписана в следующем виде:

$$[0, \Delta(1,2,2), \Delta(1,2,3), \dots].$$

Аналогичным образом обнулим элемент на месте (3,1) и повторим процедуру для вновь полученных 2-й и 3-й строк. Имеем

$$[0, 0, a_{11} \cdot \Delta(2,3,3), \dots].$$

Очевидно, все оставшиеся элементы 3-й строки делятся на a_{11} . Аналогичная ситуация имеет место для последующих строк, что обеспечивает целочисленность результатов.

Рассмотрим еще одну алгебраическую задачу, которая сводится к рекурсивному алгоритму, при этом снова встречаются определители типа $\Delta(k, i, j)$.

Пусть $f(X) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}x_i x_j$ - квадратичная форма, где $A = (a_{ij})$ - матрица квадратичной формы. К наиболее известным методам приведения квадратичной формы к каноническому виду можно отнести метод Лагранжа, метод собственных векторов и метод Якоби. Задача приведения предполагает нахождение канонических коэффициентов и соответствующего преобразования, т.е. такой матрицы B , что $A' = B^T A B$ - диагональная матрица. Для метода Лагранжа и метода собственных векторов задача приведения достаточно хорошо излагается в любом учебнике алгебры. Однако, при использовании метода Якоби (который еще называют методом унитарного преобразования), как правило, ограничиваются нахождением канонических коэффициентов. Построение соответствующего преобразования основывается на следующих теоремах [6].

Теорема 1. Пусть матрица квадратичной формы невырождена. Для того чтобы форма была преобразована к каноническому виду с помощью правой унитарной матрицы, необходимо и достаточно, чтобы главные миноры матрицы квадратичной формы были отличны от нуля.

Теорема 2. Для представления невырожденной матрицы $A = (a_{ij})$ порядка n в виде произведения левой унитарной, диагональной и правой унитарной матрицы, т.е. $A = LDR$, необходимо и достаточно, чтобы главные миноры матрицы были отличны от нуля.

Так как матрица квадратичной формы симметрична, то $A = R^T D R$. Введем обозначения:

$$A_k = \begin{pmatrix} A_{k-1} & a_k \\ b_k & a_{kk} \end{pmatrix}, \quad R_k = \begin{pmatrix} R_{k-1} & X_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_k = \begin{pmatrix} D_{k-1} & 0 \\ 0 & d_k \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $n \geq k \geq 2$, $b_k = a_k^T$.

При условии, что $A = R^T D R$, верно равенство $A_k = R_k^T D_k R_k$. Это приводит к следующим соотношениям:

$$\begin{cases} d_k = \frac{\det A_k}{\det A_{k-1}} = \frac{\Delta_k}{\Delta_{k-1}}, \\ X_k = D_{k-1}^{-1} (R_{k-1}^T)^{-1} a_k \end{cases} \quad (5)$$

где $D_1 = d_1 = a_{11}$, $R_1 = 1$, X_k - искомый столбец.

Для случая $n = 3$, имеем

$$X_2 = d_1^{-1} \cdot a_{12} = \frac{a_{12}}{\Delta_1}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{a_{12}}{\Delta_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$X_3 = D_2^{-1} \cdot (R_2^T)^{-1} \cdot [a_{13} a_{23}]^T = \begin{pmatrix} \frac{a_{13}}{\Delta_1} \\ \frac{a_{11} a_{23} - a_{12} a_{13}}{d_1 d_2} \end{pmatrix},$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{a_{12}}{\Delta_1} & \frac{a_{13}}{\Delta_1} \\ 0 & 1 & \frac{\Delta(1,2,3)}{\Delta(1,2,2)} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, мы получаем достаточно удобную формулу расчета матрицы унитарного преобразования (на самом деле, это матрица R^{-1}) квадратичной формы к каноническому виду для размерности 3.

Дальнейшие вычисления показывают, что при увеличении размерности матрица R принимает следующий вид:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \frac{a_{12}}{\Delta_1} & \frac{a_{13}}{\Delta_1} & \dots & \frac{a_{1j}}{\Delta_1} & \dots \\ 0 & 1 & \frac{\Delta(1,2,3)}{\Delta(1,2,2)} & \dots & \frac{\Delta(1,2,i)}{\Delta(1,2,2)} & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \frac{\Delta(2,3,i)}{\Delta(2,3,3)} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Выводы. Рассмотренные выше задачи вычисления определителей без использования дробей и построения матрицы унитарного преобразования квадратичной формы к каноническому виду сводятся к рекурсивным алгоритмам, которые связаны с применением функции determ . Кроме того, получена удобная формула расчета матрицы унитарного преобразования квадратичной формы к каноническому виду для размерности 3.

Литература

1. Акритас А. Основы компьютерной алгебры с приложениями / Пер. с англ. – М.: Мир, 1994. – 544 с.
2. Дэвенпорт Дж., Сирэ И., Турнье Э. Компьютерная алгебра: символьные и алгебраические вычисления / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 350 с.
3. Кузнецов М. И. и др. Компьютерная алгебра. - Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2002. – 223 с.
4. Панкратьев Е. В. Элементы компьютерной алгебры. – М.: БИНОМ, 2007. – 248 с.
5. Компьютерная алгебра. Символьные и алгебраические вычисления / Пер. с англ. / Под ред. Б. Бухбергера, Дж. Коллинза, Р. Лооса. – М.: Мир, 1986. – 392 с.
6. Фаддеев Д.К. Лекции по алгебре. Учебное пособие для вузов - М.: Наука, 1984. – 416 с.

References

1. Akritas A. Osnovy komp'juternoj algebry s prilozhenijami / Per. s angl. – M.: Mir, 1994. – 544 s.
2. Djevenport Dzh., Sirje I., Turn'e Je. Komp'juternaja algebra: simvol'nye i al-gebraicheskie vychislenija / Per. s angl. – M.: Mir, 1991. – 350 s.
3. Kuznecov M. I. i dr. Komp'juternaja algebra. - N. Novgorod: Izd-vo Nizhego-rod. gos. un-ta, 2002. – 223 s.
4. Pankrat'ev E. V. Jelementy komp'juternoj algebry. – M.: BINOM, 2007. – 248 s.
5. Komp'juternaja algebra. Simvol'nye i algebraicheskie vychislenija / Per. s angl. / Pod red. B. Buhbergera, Dzh. Kollinza, R. Loosa. – M.: Mir, 1986. – 392 s.
6. Faddeev D.K. Lekcii po algebre. Uchebnoe posobie dlja vuzov - M.: Nauka, 1984. – 416 s.

Some problems of computer algebra, concerned with matrix calculations and quadratic forms have been considered in the article. Realization of corresponding algorithms is proposed in the well-known Maxima system of symbolic calculations.

В статті розглянуті деякі задачі комп'ютерної алгебри, які пов'язані з матричними обчисленнями та квадратичними формами. Реалізація відповідних алгоритмів пропонується у відомій системі символьних обчислень Maxima.

Стативка Юрій Іванович, к.т.н., доцент, декан факультету математики та інформатики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Тімошин Анатолій Сергійович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та комп'ютерних технологій Інституту хімічних технологій Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Пожидас В.Ф., д.т.н., проф., завідувач кафедри інформатики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

О.А. Погорелов, В.А. Колесников, А.И. Балицкий

г. Луганск

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧАСТИЦ ИЗНОСА МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В статье описывается система компьютерного зрения, предназначенная для определения формы частиц износа по одному полутоновому изображению, полученному под микроскопом. Полученную информацию предполагается использовать для автоматической идентификации характера разрушений сплавов в условиях трения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, частицы износа, продукты износа, полутоновое изображение, карта отражательной способности, игольчатая диаграмма, карта дальности, обработка изображений, частицы износа стали, продукты износа стали.

Постановка проблемы. Анализ частиц износа (продуктов износа), является очень информативным способом, позволяющим проанализировать разрушение материалов в условиях трения. Поскольку размер частиц не превышает 300 мкм, исследования проводятся с помощью микроскопа. Предметом изучения являются размеры и морфология частиц. При проведении систематических исследований растущий объем обрабатываемой информации требует автоматизации процесса с привлечением обработки изображений методами компьютерного зрения. Такая обработка, помимо сокращения сроков работы, способна придать более объективный характер проводимым исследованиям, и следующим из них выводам. Например, обладая данными о морфологии частицы износа и поверхности трения, появляется возможность анализировать и прогнозировать наступление катастрофического износа, приводящего к выходу из строя деталей машин и механизмов.

Анализ последних исследований и публикаций. Авторами работ [1-3] проводились исследования по изучению продуктов износа высокоазотистых сталей (после предварительного наводороживания), работающими в контакте с конструкционной сталью. Химический состав и свойства исследуемых сталей приведены в табл. 1. Высокоазотистая сталь типа P900* имела аустенитную микроструктуру. Трибологические испытания проводили на стационарной лабораторной установке СМТ – 1 (2070). Скорость скольжения нижнего ролика составляла 1480 оборотов в минуту, а верхнего 1240 (проскальзывание составляло 15%). Нижний ролик (диаметр 42 мм) изготовлен из стали 1.0503 (Германия) С 45/Ск 45 (DIN), 1045 (США) (HRC = 60 ед.), аналог стали 45. А верхний ролик из высокоазотистой стали P900 твердостью 55 HRC. Линейная скорость верхнего ролика составляла 2,27 м/с, а нижнего 3,08 м/с.

Т а б л и ц а 1

Химический состав исследуемых сталей

№ п/п	Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
1.	P900*	0.06	0.52	19.4	17.5	0.13	2.08	0.14	0.97
2.	Сплав 2	0.08	0.38	19.0	17.8	1.18	0.13	0.12	0.58
3.	1.0503**	0.42-0.5	0.17-0.37	–	0.25	0.25	–	–	–

* т.е. сталь типа P900,

**S до 0.04%, P до 0.035, C до 0.25, Cu до 0.25, As до 0.08.

Исследование продуктов износа проводили с помощью микроскопа Neophot 2 с подключением к нему ноутбука и цифровой камеры Canon EOS 30D. Это позволило определить размеры частичек износа и сфотографировать их в различных режимах освещения. Поверхности трения снимали на электронном микроскопе EVO-40XVP с системой микроанализа INCA Energy 350.

Размеры продуктов изнашивания составляли 20...30 мкм (при нагрузке $P = 400$ N), 40...50 мкм ($P = 50$ кг), однако иногда фиксировались частички длиной 100 мкм (рис.2а). После наводораживания сплава № 1, интенсивность изнашивания выросла в 5-ть раз (рис. 1, столбик 3), а размеры продуктов изнашивания составляли 350 мкм при $P = 250$ N (рис 2б), а при $P = 400$ N, линейные размеры продуктов изнашивания были 600...1000 мкм. Визуальное изучение частиц износа позволило определить то, что среди продуктов износа были и такие, чей размер был в пределах доли микрометра, или нескольких микрометров. На начальном этапе трения одна сторона частички износа была гладкой, а другая имеет следы вырывов (схватывания).

Цель работы – является разработка системы компьютерного зрения, предназначенной для определения формы частиц износа по одному полутоновому изображению, полученному под микроскопом.

Материалы и результаты исследования. Материалами работы являлись цифровые фотографии стальных частичек износа, полученные с помощью микроскопов. Программное обеспечение системы было написано на языке программирования Object Pascal в среде визуального программирования Delphi.

Карта дальности

Для описания формы поверхности распознаваемых графических объектов используется множество различных способов [4]. В данной работе применяется функция $z(x, y)$, заданная в декартовой прямоугольной системе координат. Плоскость x, y совпадает с плоскостью изображения, а ось z направлена к наблюдателю, как это принято в работе [5]. В компьютере функция $z(x, y)$ представлена в дискретном виде. В этом случае она называется *картой дальности*.

Игольчатая диаграмма

При восстановлении формы поверхности по единственному полутоновому изображению удобно пользоваться так называемой *игольчатой диаграммой* – проекцией единичных нормалей к поверхности объекта на плоскость изображения. Направление каждой нормали определяется всего двумя параметрами $p = \partial z / \partial x$ и $q = \partial z / \partial y$, поскольку эти векторы имеют единичную длину [5]. Если известна карта дальности $z(x, y)$, то по ней можно восстановить игольчатую диаграмму – достаточно найти первые частные производные p и q от этой функции. Обратная задача обладает неустойчивостью, однако методы регуляризации позволяют справиться с этой проблемой.

Карта отражательной способности

Чтобы однозначно решить задачу определения формы поверхности объекта по его единственному полутоновому изображению, необходимо располагать знаниями об отражательных свойствах поверхности и положении источника освещения. Эта информация содержится в *карте отражательной способности объекта* [5]. Карта отражательной способности представляет собой нормированную на единицу функцию $R(p, q)$, которая связывает яркость пикселя на изображении с соответствующей этому пикселю ориентацией элементарной площадки объекта.

В фотометрии различают диффузное и зеркальное отражение света от различных поверхностей. Поскольку частицы износа состоят из металла, они отражают свет зеркально. Однако, из-за того, что поверхности частиц не являются гладкими, это отражение огромного количества «зеркал», ориентации которых немного различаются. Такое отражение называется *глянцевым*. Для описания отражательной способности частиц износа в данной работе используется следующая индикатриса рассеяния

$$R(\beta) = (\cos \beta)^n, \quad (1)$$

где β – угол между направлением «чистого» зеркального отражения от элементарной площадки объекта и направлением на наблюдателя (осью z), n – положительное целое число. При $n \gg 1$ индикатриса (1) сильно вытянута вперед, что является характерным свойством глянцевого отражения. Параметр n является показателем этой вытянутости.

Использование теорем евклидовой геометрии позволяет получить формулу

$$\cos \beta = 2 \cos \alpha \cdot \cos \theta - \cos \gamma, \quad (2)$$

где α – угол между нормалью к элементарной площадке объекта и направлением на источник освещения, θ – угол между нормалью к элементарной площадке и направлением на наблюдателя (осью z), γ – угол между направлением на источник освещения и направлением на наблюдателя. Углы в правой части выражения (2) можно выразить через градиент функции $z(x, y)$ с помощью известных формул [5]:

$$\cos \alpha = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}}, \quad \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, \quad \cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}},$$

где p_s, q_s – параметры, определяющие направление на источник освещения.

Этапы обработки изображения

Для получения формы поверхности частиц износа использовался следующий алгоритм. На исходном изображении (рис. 1а) выделялась область, соответствующая изучаемому объекту (рис. 1б). При этом использовалась высокая отражательная способность частиц износа по сравнению с фоном и методы порогового разделения [6].

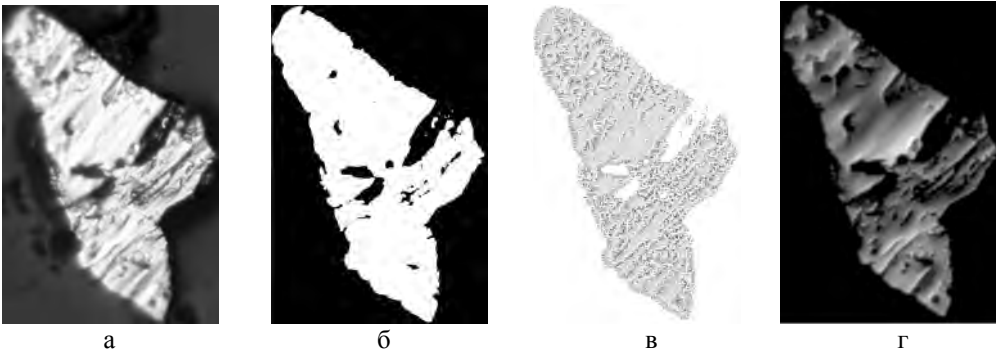


Рис. 1. Этапы обработки изображения: а – исходное изображение, б – бинарное изображение, в – игольчатая диаграмма, г – карта дальности

Затем вычислялась игольчатая диаграмма объекта (рис. 1в), на основании которой рассчитывалась карта дальности (рис. 1г). Карта дальности представлена таким образом, что чем светлее пиксель изображения, тем ближе в этом месте поверхность объекта к наблюдателю. Карта дальности содержит информацию о форме поверхности частицы износа, которая в данной системе является выходом.

Построение игольчатой диаграммы

Координаты нормалей к поверхности объекта для некоторых пикселей можно однозначно восстановить по изображению. Это относится к нормальям на ограничивающем объект контуре, на разрывах непрерывности поверхности, и на «бликах» – самых ярких точках на поверхности объекта. На контуре и на разрывах непрерывности нормали лежат в плоскости x, y и направлены ортогонально линии контура или разрыва. Блики соответствуют ярким пятнам на изображении, поскольку здесь направление на наблюдателя и направление зеркального отражения совпадают. Нормали в этих точках, в соответствии с законом Альхазена, лежат в плоскости, задаваемой направлениями на источник освещения и на наблюдателя, их положение симметрично относительно этих направлений.

Нормали в остальных точках определяются с помощью численного итеративного метода, предложенного в работе [7]:

$$f_{kl}^{n+1} = \bar{f}_{kl}^n + \lambda [E_{kl} - R_s(f_{kl}^n, g_{kl}^n)] \partial R_s / \partial f, \quad (3)$$

$$g_{kl}^{n+1} = \bar{g}_{kl}^n + \lambda [E_{kl} - R_s(f_{kl}^n, g_{kl}^n)] \partial R_s / \partial g, \quad (4)$$

где $f = \frac{2p}{1 + \sqrt{1 + p^2 + q^2}}$, $g = \frac{2q}{1 + \sqrt{1 + p^2 + q^2}}$ – координаты стереографической проекции [5], E_{kl} – яркость пикселя с координатами k, l на изображении; R_s – карта отражательной способности, выраженная в стереографических координатах; n – номер итерации, \bar{f} , \bar{g} – локальные средние f и g , определяемые по формулам:

$$\bar{f}_{kl} = (1/5) \cdot (f_{k+1,l} + f_{k,l+1} + f_{k-1,l} + f_{k,l-1}) + (1/20) \cdot (f_{k+1,l+1} + f_{k+1,l-1} + f_{k-1,l-1} + f_{k-1,l+1}),$$

$$\bar{g}_{kl} = (1/5) \cdot (g_{k+1,l} + g_{k,l+1} + g_{k-1,l} + g_{k,l-1}) + (1/20) \cdot (g_{k+1,l+1} + g_{k+1,l-1} + g_{k-1,l-1} + g_{k-1,l+1}).$$

Вычисление карты дальности

Если известны значения p и q , мы можем восстановить $z(x, y)$ путем интегрирования вдоль произвольных кривых на плоскости

$$z(x, y) = z(x_0, y_0) + \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} (pdx + qdy).$$

Однако p и q восстанавливаются по зашумленным данным. Поэтому интеграл может зависеть от выбора пути. Так как известны и p , и q , мы реально имеем больше информации, чем необходимо. Это позволяет использовать метод оптимизации для нахождения поверхности, наилучшим образом соответствующей неидеальным оценкам градиента [5]. В данной работе для этой цели использовался следующий итеративный алгоритм:

$$z_{kl}^{n+1} = \bar{z}_{kl}^n - (1/2) \cdot (p_{k+1,l} - p_{k-1,l} + q_{k,l+1} - q_{k,l-1}), \quad (5)$$

где $\bar{z}_{kl} = (1/5) \cdot (z_{k+1,l} + z_{k,l+1} + z_{k-1,l} + z_{k,l-1}) + (1/20) \cdot (z_{k+1,l+1} + z_{k+1,l-1} + z_{k-1,l-1} + z_{k-1,l+1})$.

Программное обеспечение

На основании изложенной теории была разработана система компьютерного зрения, позволяющая определять форму частиц износа по полутоновым изображениям, полученным с помощью микроскопа. Программное обеспечение системы было написано на языке программирования Object Pascal в среде визуального программирования Delphi.

Входом системы является изображение частицы износа, а выходом – карта дальности, которая содержится в памяти компьютера и может быть представлена в виде полутонового изображения, предназначенного для контроля человеком. На рис. 2 показаны изображения двух частиц износа и соответствующие им карты дальности, определенные с помощью компьютера.

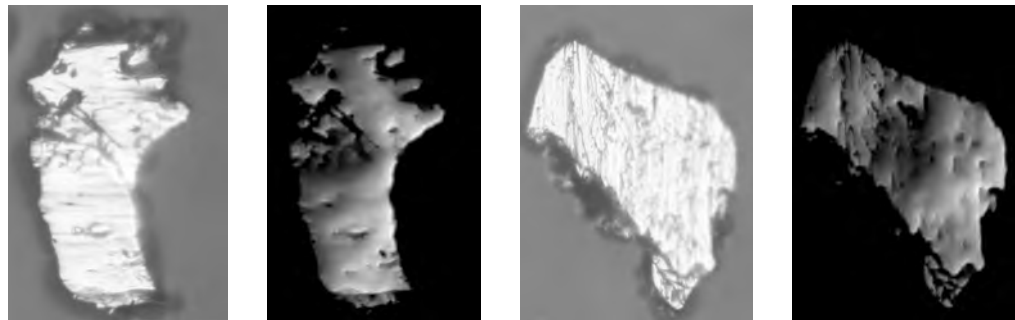


Рис. 2. Исходные изображения и соответствующие им карты дальности двух стальных частиц износа

Выводы

На основании изложенной теории была разработана система компьютерного зрения, позволяющая определять форму частиц износа сталей по полутоновым изображениям, полученным с помощью микроскопа. Программное обеспечение системы было написано на языке программирования Object Pascal в среде визуального программирования

ния Delphi. Полученные результаты позволяют восстанавливать форму поверхности частиц износа сталей по одному полутоновому изображению, что дает возможность автоматизировать процесс идентификации характера разрушения металлических материалов в условиях трения. Дальнейшее исследование в этом направлении будет посвящено вопросам разработки критериев для классификации характера разрушения стальных материалов в условиях трения, и созданию программного обеспечения для осуществления такой классификации в автоматическом режиме.

Л и т е р а т у р а

1. Balyts'kyi O.I. Investigation of wear products of high nitrogen manganese steels [Text] / O. I. Balytskyi, V. O. Kolesnikov // *Materials Science (Springer)*. – 2009, vol. 45, N 4.- P.576 - 581.
2. Колесников В.А., Балицкий А.И., Хмель Я. Особенности морфологии продуктов износа высокоазотистых сталей до наводороживания и после, в условиях сухого трения // *Вісник Східно-українського національного університету імені Володимира Даля* // Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2009. – №_6(136). – Частина 2. – С.185 - 192.
3. Kolesnikov V.O. Investigation of the wear products of high-nitrogen steel after hydrogenation // *Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa XA/2010. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture – OLPAN, 2010, 10A,271 -275 p.* <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot10a/Kolesnikov.pdf>.
4. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход/ Дэвид Форсайт, Жан Понс [пер. с англ. А.В. Назаренко, И.Ю. Дорошенко]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
5. Хорн Б.К.П. Зрение роботов/ Бертольд Клаус Поль Хорн [пер. с англ. И.М. Бродской, Е.Ю. Зуевой, А.Ю. Каргашина]. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB/ Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс [пер. с англ. В.В. Чепыжова]. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
7. Ikeuchi K., Horn B. K. P., Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries, *Artificial Intelligence*, 17, Nos. 1-3, 141-184 (1981).

R e f e r e n c e s

1. Balyts'kyi O.I. Investigation of wear products of high nitrogen manganese steels [Text] / O. I. Balytskyi, V. O. Kolesnikov // *Materials Science (Springer)*. – 2009, vol. 45, N 4.- P.576 - 581.
2. Kolesnikov V.A., Balickij A.I., Hmel' Ja. Osobennosti morfologii produktov iznosa vysokoazotistyh stalej do navodorazhivaniya i posle, v uslovijah suhogo trenija // *Visnik Shidno-ukraїnskogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja* // Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2009. – №_6(136). – Chastina 2. – S.185 - 192.
3. Kolesnikov V.O. Investigation of the wear products of high-nitrogen steel after hydrogenation // *Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa XA/2010. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture – OLPAN, 2010, 10A,271 -275 p.* <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot10a/Kolesnikov.pdf>.
4. Forsajt D. Komp'juternoe zrenie. Sovremennyj podhod/ Djevid Forsajt, Zhan Pons [per. s angl. A.V. Nazarenko, I.Ju. Doroshenko]. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2004. – 928 s.
5. Horn B.K.P. Zrenie robotov/ Bertol'd Klaus Pol' Horn [per. s angl. I.M. Brodskoj, E.Ju. Zuevoj, A.Ju. Kargashina]. – M.: Mir, 1989. – 487 s.
6. Gonsales R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v srede MATLAB/ R. Gonsales, R. Vuds, S. Jeddins [per. s angl. V.V. Chepyzhova]. – M.: Tehnosfera, 2006. – 616 s.
7. Ikeuchi K., Horn B. K. P., Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries, *Artificial Intelligence*, 17, Nos. 1-3, 141-184 (1981).

Погорелов О.О., Колесніков В.О., Балицький О.І.

Обробка зображень частинок зносу методами комп'ютерного зору

У статті описується система комп'ютерного зору, призначена для визначення форми частинок зносу за допомогою одного півтонового зображення, одержаного під мікроскопом. Отриману інформацію передбачається використовувати для автоматичної ідентифікації характеру руйнувань сплавів в умовах тертя.

Ключові слова: комп'ютерний зір, частинки зносу, продукти зношування, півтонове зображення, карта відбивної здатності, голчата діаграма, обробка зображень, карта дальності, частинки зносу сталі, продукти зносу сталі.

Pogorelov O.O., Kolesnikov V.O., Balitskij O.I.

Wear particles images processing by methods of computer vision

The system of computer vision, intended for determination wear particles shape with help of one shading image got under a microscope, is described in the article. It is assumed to use obtained information for automatic identification of alloys destructions nature in the conditions of friction.

Keywords: computer vision, particles of wear, products of wear, shading image, reflectance map, needle map, depth map, particles of steel wear, products of steel wear.

Погорелов О.О., д.т.н. проф., кафедри комп'ютерних наук Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Колесніков В.О., к.т.н., доц., зав. кафедри інженерних дисциплін, зам. декана з наукової роботи Краснодонського факультету інженерії та менеджменту Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Балицький О.І., д.т.н. проф., зав. відділом водневої стійкості матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів).

Рецензент: Ульшин В.О., д.т.н., професор, завідувач кафедри системної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

УДК 621.833.5

Н.Л. Утутов, А.П. Карпов, С.Ю. Ефанов

г. Луганск

О ФУНКЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА

В статье получена функция передаточного отношения кривошипно-ползунного механизма с учетом начального угла поворота кривошипа от линии, проходящей через ось вращения кривошипа и ползун в его максимальном удалении от оси вращения кривошипа. Рис. 3, ист. 3.

Постановка задачи. Кривошипно-ползунные механизмы широко применяют в различных отраслях машиностроения. Геометрический расчет этих механизмов проводят в основном аналитическими и графо-аналитическими методами. Определенную трудность в аналитических расчетах составляет определение функции передаточного отношения кривошипно-ползунного механизма, от которой зависит кинематическая характеристика механизма.

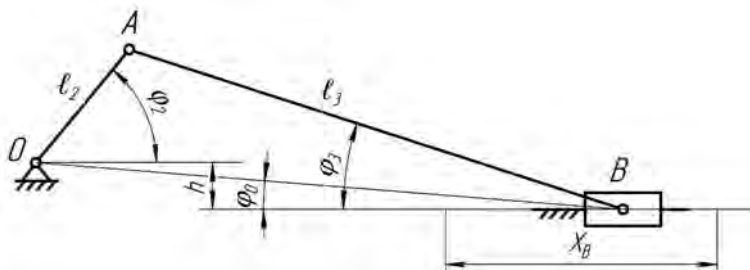


Рис. 1. Кривошипно-ползунный механизм

Состояние вопроса. В книге С.Н. Кожевникова [1] приведено уравнение функции передаточного отношения кривошипно-ползунного механизма (рис. 1):

$$i_{42} = \frac{\sin(\phi_2 + \phi_3)}{\cos \phi_3}, \quad (1)$$

где ϕ_2 – угол поворота кривошипа, ϕ_3 – угол качания шатуна: для дезаксиального механизма

$$\cos \phi_{3(\phi)} = 1 - \frac{1}{2} (\lambda \sin \phi_2 - \chi)^2, \quad (2)$$

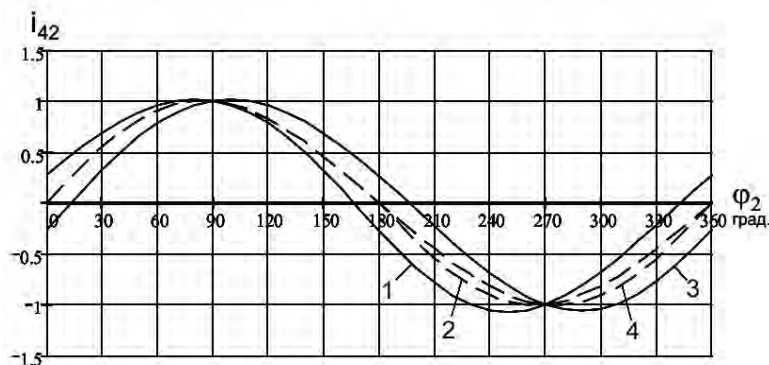


Рис. 2. Графики функций передаточных отношений кривошипно-ползунного механизма:
1 – дезаксиального и 2 – центрального по формуле (1);
3 – дезаксиального по формуле (8); 4 – центрального по формуле (9)

для центрального механизма

$$\cos \phi_{3(\psi)} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \phi_2, \quad (3)$$

λ и χ – характеристики кривошипно-ползунного механизма, определяемые по зависимостям:

$$\lambda = \frac{\ell_2}{\ell_3}, \quad (4)$$

$$\chi = \frac{h}{\ell_3}, \quad (5)$$

ℓ_2 – длина кривошипа, ℓ_3 – длина шатуна, h – дезаксиал, X_B – перемещение ползуна (ход).

По зависимости (2) определяем для дезаксиального механизма:

$$\phi_{3(\phi)} = \arccos \left[1 - \frac{1}{2} (\lambda \sin \phi_2 - \chi)^2 \right]. \quad (6)$$

Аналогично из (3) получаем для центрального механизма:

$$\phi_{3(\psi)} = \arccos \left[1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \phi_2 \right]. \quad (7)$$

В работе [2] получена функция передаточного отношения кривошипно-ползунного механизма: дезаксиального

$$i_{42(\phi)} = \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi_2 + \sin \phi_2 - \chi \cos \phi_2 \quad (8)$$

и центрального

$$i_{42(\psi)} = (1 + \lambda \cos \phi_2) \sin \phi_2. \quad (9)$$

В практических расчетах часто применяют приближенную функцию передаточного отношения:

$$i_{42} = \sin \phi_2 . \quad (10)$$

Основная часть. Для оценочного анализа передаточных отношений по уравнениям (1) с учетом значений (2) и (6) для дезаксиального и значений (3) и (7) для центрального механизмов соответственно, а также по уравнениям (8) и (9) проведены вычисления для значений $\lambda = 0,10526$; $\chi = 0,26246$, и построены графики (рис. 2).

Из графиков (рис. 2) следует, что в дезаксиальном механизме в конечных точках перемещения ползуна передаточные отношения не равны нулю. Это должно вызывать вредные динамические явления. В реальных конструкциях этого не происходит. Такие результаты получаются из-за некорректного выбора начал отсчета углов поворота кривошипа.

Из графиков (рис. 2) следует, что функции передаточных отношений (1) и (8) для дезаксиальных, (1) и (9) для центральных механизмов практически мало отличаются.

Из треугольника OAB (рис. 1) при положении ползуна на максимальном расстоянии от оси вращения кривошипа определяем:

$$\phi_{0\min} = \arcsin \frac{h}{\ell_3 + \ell_2} . \quad (11)$$

При положении ползуна на минимальном расстоянии от оси вращения кривошипа аналогично определяем:

$$\phi_{0\max} = \arcsin \frac{h}{\ell_3 - \ell_2} . \quad (12)$$

Углы ϕ_0 , как видно из рис. 1, являются начальными углами отсчета углов поворота кривошипа. Из выражений (11) и (12) следует, что начальный угол отсчета ϕ_0 является величиной постоянной для заданных геометрических параметров ℓ_2 , ℓ_3 и h . Для центрального механизма $\phi_0 = 0$.

Очевидно, в расчетах следует принимать минимальное значение (11) в формулах функций передаточных отношений.

Для значений $\ell_2 = 38,1 \text{ мм}$, $\ell_3 = 361,95 \text{ мм}$, $h = 95,25 \text{ мм}$, $\lambda = 0,10526$, $\chi = 0,26246$, $\phi_0 = 13,635^\circ$ построены графики (рис. 3) по результатам вычислений по формулам (1), (6), (7), (8) и (10) с учетом в них угла $\phi_2 = \phi_2 + \phi_{0\min}$.

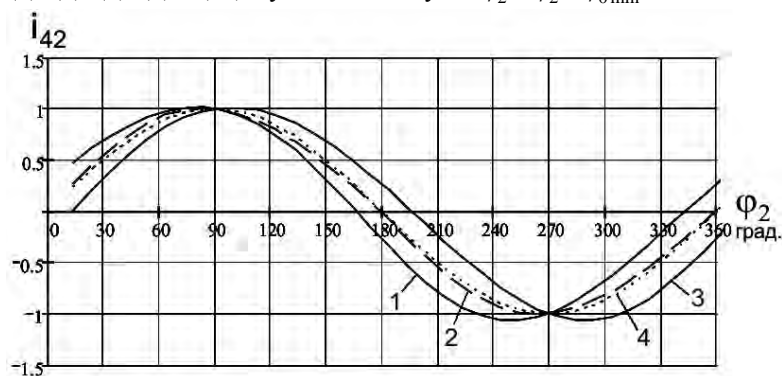


Рис. 3. Графики функций передаточных отношений кривошипно-ползунного механизма с учетом начального угла отсчета $\phi_{0\min}$ поворота кривошипа:

- 1 – дезаксиального и 2 – центрального по формуле (1);
- 3 – дезаксиального по формуле (8); 4 – приближенного по формуле (10)

Из графиков (рис. 3) следует, что при начале углов отсчета поворота кривошипа от линии, соединяющей ось вращения кривошипа и ползун в его наибольшем удалении от оси кривошипа, графики для дезаксиального и центрального механизмов совпадают.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что при проектных расчетах кривошипно-ползунных механизмов следует принимать функцию передаточного отношения (7) или (8), как более простые или более удобные при расчетах, а в качестве приближенной – функцию (10).

Л и т е р а т у р а

1. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 584 с.
2. Утутов Н.Л., Старощук Т.А., Кулешов С.А. Синтез передаточной функции уравнительных передач для кривошипно-ползунных механизмов // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2002. – №17(29). – С. 131-134.
3. Сабликов М.В. Сельскохозяйственные машины. – М.: Колос, 1968. – 296 с.

R e f e r e n c e s

1. Kozhevnikov S.N. Teorija mehanizmov i mashin. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 584 s.
2. Ututov N.L., Starowuk T.A., Kuleshov S.A. Sintez peredatochnoj funkicii uravnitel'nyh peredach dlja krivoshipno-polzunnyh mehanizmov // Zbirnik naukovih prac' Lugans'kogo nacional'nogo agrarnogo universitetu. Serija: tehnicni nauki. – Lugans'k: Vid-vo LNAU, 2002. – №17(29). – S. 131-134.
3. Sablikov M.V. Sel'skohozijsajstvennye mashiny. – M.: Kolos, 1968. – 296 s.

В статье получена функция передаточного отношения кривошипно-ползунного механизма с учетом начального угла поворота кривошипа от линии, проходящей через ось вращения кривошипа и ползун в его максимальном удалении от оси вращения кривошипа. Рис. 3, ист. 3.

У статті отримана функція передатного відношення кривошипно-повзунного механізму з урахуванням початкового кута оберту кривошипа від лінії, що проходить через вісь обертання кривошипа й повзун у його максимальному видаленні від осі обертання кривошипа. Рис. 3, джер. 3.

In article the function of transmission ratio of a slide-crank mechanism is obtained taking into account the initial crank angle from a line passing through crank rotational axis and slide in of it maximal distance from crank rotational axis. Fig. 3, source. 3.

Утутов Микола Лазарович, докт. техн. наук, професор, професор кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Карпов Олексій Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Єфанов Сергій Юрійович, студент факультету транспортних систем і логістики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Шишов В.П., д.т.н., проф. кафедри «Машинознавство» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ БОРЬБЫ С ПЫЛЬЮ В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ

В статье проведен анализ технических средств уборки пыли в литейных цехах, рассматриваются полезные модели пылеуборочных насадок для вакуумной централизованной уборки. Ист. 8.

Ключевые слова: литье, пылеобразование, вакуумные централизованные системы, пылеуборочные насадки.

Постановка проблемы. Вредное воздействие отдельных производственных факторов на здоровье работающих в литейном производстве находит отражение в случаях профессиональной заболеваемости [1,2], а также может усугублять течение других заболеваний. Этому способствуют недостаточное техническое оснащение производства в современных сложных социально-экономических условиях, несоблюдение необходимых санитарно-гигиенических норм (превышение запыленности, загазованности, вибрации, шума во много раз), длительный стаж работы в неблагоприятных условиях труда. Совершенствование технических средств борьбы с преобладающим вредным фактором – пылью – является актуальной проблемой улучшения условий труда в литейных цехах.

Анализ последних исследований и публикаций. Основными источниками пылеобразования в литейных цехах являются вибрация, движение воздуха, просыпи песка и формовочной смеси в результате нарушения технологической эксплуатации оборудования, несвоевременный и некачественный ремонт оборудования, а также транспортировка (например, по конвейеру, отработанной смеси на регенерацию), погрузка и разгрузка сыпучих материалов [3,4]. В связи с тем, что большинство источников пылеобразования в литейном производстве исключить или усовершенствовать достаточно сложно, возникает необходимость удаления пыли после ее образования.

Анализ технических средств для уборки цехов от пыли и просыпей различных сыпучих материалов проведен нами по литературным источникам [1,5] и в литейных цехах ХК «Лугансктепловоз», на Луганском литейно-механическом заводе и на других предприятиях региона. Выявлены причины вторичного пылеобразования – уборка метлами, щетками, обдувка сжатым воздухом.

Целью работы является разработка технических средств для уборки тонких слоев пыли, а также слежавшихся слоев сыпучих материалов.

Материалы и результаты исследований. Проведенный анализ средств уборки в литейных цехах показал, что существующие методы уборки в литейных цехах неэффективны, к тому же некоторые из них приводят ко вторичному образованию пыли. Установлено, что наиболее эффективным средством уборки являются централизованные вакуумные системы, которые не требуют большого количества обслуживающего персонала и значительно снижают вторичное пылеобразование. Для данных систем технической проблемой является несовершенство разработанного пылеуборочного оборудования (пылеуборочных насадок и пылеуловителей). Существующие пылеуборочные насадки (коллекторные, полочные, эжекторные и др.) громоздки и имеют низкую производительность.

Для решения данной задачи, то есть уборки больших просыпей формовочной смеси, песка и слежавшейся пыли разработана полезная модель эжекторной пылеуборочной насадки – патент №44275 от 25.09.2009 года бюллетень №18 [6]. Данная эжекторная пылеуборочная насадка проста и удобна в эксплуатации, она обеспечивает высокое качество уборки слежавшегося сыпучего материала из вороха. При уборке тонких слоев пыли и на не ровной поверхности применение данной эжекторной насадки неэффективно.

Для уборки пыли на не ровных поверхностях предложена полезная модель пылеуборочной насадки – патент №53997 от 25.10.2010 года бюллетень №20 [7]. Данная полезная модель награждена серебряной медалью Международного салона изобретений и новых технологий «Новое время». Пылеуборочная насадка может использоваться для устройств вакуумной уборки на предприятиях строительной, металлургической и других отраслей промышленности. В полезной модели данной насадки на верхний и нижний края всасывающей щели наплавлен легированный металл (например, хромовольфрамовая или хромомолибденовая сталь с твердостью 52-60 HRC), что повысило износостойкость и увеличило срок ее службы. На трубке над верхней кромкой нижней щели выполнены отверстия, что значительно подняло продуктивность насадки при работе на неровных поверхностях и на поверхностях с тонким слоем пыли, а также при работе с пылью, в составе которой имеются абразивные включения. Соединение патрубка пылеуборочной насадки со втулкой пылеуборочной системы, выполнено с ходовой резьбой, что расширило возможность быстрой смены насадок. Использование данной пылеуборочной насадки на неровной поверхности со слежавшимся сыпучим материалом является недостаточно эффективным

Для уборки слежавшейся пыли на неровной поверхности предложена полезная модель пылеуборочной насадки – патент №55659 от 27.12.2010 года бюллетень №21 [8]. Преимущество данной полезной модели состоит в том, что заостренный скребок выполнен в виде рамки с перегородками, в которую вставляется сетка с квадратными ячейками. Это увеличивает срок службы за счет возможности смены сетки в рамке скребка в случае засорения или ее износа. Соединение патрубка насадка с втулкой системы выполнено с помощью ходовой резьбой, что позволяет быстро сменить данный насадок на другую модель.

Вывод. Конструкции предложенных насадок просты. Они удобны в эксплуатации. Увеличился срок их службы. Предложенные средства уборки повышают скорость и качество уборки, а также в случае необходимости – быструю смену насадок.

Л и т е р а т у р а

1. Перцев Д.П. Умови праці ливарників при одержанні великогабаритних виливок у металевих формах // Експер. і клін. Медицина. – 2003. – №3 – 4. – С. 195-196.
2. Тимошина Д. Стан професійної захворюваності в Україні / Тимошина Д., Лубянова І., Басанець А., Харченко Т. // Охрана труда. – 2010. – №3 (115). – С.48-53.
3. Трахтенберг І.М. Гігієна праці та виробнича санітарія / Трахтенберг І.М., Коршун М.М., Чабанова О.В. // К., 1997. - 464 с.
4. Супаков Н.К. Методика оценки безопасности оборудования на основе моделирования возможного поражения человека в процессе труда и определения уровня безопасности // Проблемы охраны труда: Тез. докл. 3-й Всесоюз. межвуз. конф. – Кишинев: Штиинца, 1978. – С. 42-43.
5. Соболев А.А. Исследование некоторых насадок-сопел для уборки пыли / Соболев А.А., Васильев А.В. // 2-я Международная научно-техническая конференция «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРІТ 2005». – Тольятти, 2005, с. 122-125.
6. Шинкарьова Т.А., Гедрович А.І., Носко П.Л., Шинкарьов О.П. Ежекторна пилоприбиральна насадка. Корисна модель // Державний департамент інтелектуальної власності. Патент України № 44275 от 05.05.09 Опубл. 25.09.09. Бюл. №18.
7. Шинкарьова Т.А., Гедрович А.І., Шинкарьов М.О. Пилоприбиральна насадка. Корисна модель // Державний департамент інтелектуальної власності. Патент України № 53997 від 25. 10. 2010. Бюл. № 20.
8. Шинкарьова Т.А., Гедрович А.І., Шинкарьов М.О. Пилоприбиральний насадок. Корисна модель // Державний департамент інтелектуальної власності. Патент України № 55659 від 27. 12. 2010. Бюл. № 21.

R e f e r e n c e s

1. Percev D.P. Umovi praci livarnikov pri oderzhanni velikogabaritnih vilivok u meta-levih formah // Eksper. i klin. Medicina. – 2003. – №3 – 4. – S. 195-196.
2. Timoshina D. Stan profesijnoi zahvorjuvanosti v Ukraїni / Timoshina D., Lubjanova I., Basanec' A., Narchenko T. // Ohrana truda. – 2010. – №3 (115). – S.48-53.

3. Trahtenberg I.M. Gigiena praci ta virobniča sanitarija / Trahtenberg I.M., Korshun M.M., Chabanova O.V. // K., 1997. - 464 s.
4. Supakov N.K. Metodika ocenki bezopasnosti oborudovanija na osnove modelirovanija vozmozhnogo porazhenija cheloveka v processe truda i opredelenija urovnja bezopasnosti // Problemy ohrany truda: Tez. dokl. 3-j Vsesojuz. mezhvuz. konf. – Kishinev: Shtiinca, 1978. – S. 42-43.
5. Sobolev A.A. Issledovanie nekotoryh nasadok-sopel dlja uborki pyli / Sobolev A.A., Vasil'ev A.V. // 2-ja Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti promyshlenno-transportnyh kompleksov ELPIT 2005». – Tol'jatti, 2005, s. 122-125.
6. Shinkar'ova T.A., Gedrovich A.I., Nosko P.L., Shinkar'ov O.P. Ezhektorna pilopribira-l'na nasadka. Korisna model' // Derzhavnij departament intelektual'noї vlasnosti. Patent Ukraї-ni № 44275 ot 05.05.09 Opubl. 25.09.09. Bjul. №18.
7. Shinkar'ova T.A., Gedrovich A.I., Shinkar'ov M.O. Pilopribiral'na nasadka. Korisna model' // Derzhavnij departament intelektual'noї vlasnosti. Patent Ukraїni № 53997 vid 25. 10. 2010. Bjul. № 20.
8. Shinkar'ova T.A., Gedrovich A.I., Shinkar'ov M.O. Pilopribiral'nij nasadok. Korisna model' // Derzhavnij departament intelektual'noї vlasnosti. Patent Ukraїni № 55659 vid 27. 12. 2010. Bjul. № 21.

Шинкарьова Т. А., Гедрович А.І.

Вдосконалення засобів боротьби з пилом в ливарних цехах

У статті проведений аналіз технічних засобів прибирання пилу в ливарних цехах, розглядені корисні моделі пилоприбиральних насадків для вакуумного централізованого прибирання.

Ключеві слова: литва, пилоутворення, вакуумні централізовані системи, пилоприбиральні насадки.

Shinkareva T. A., Gedrovich A.I.

Perfection of facilities of fight against a dust in casting workshops

In the article the analysis of technical equipments of cleaning up of dust is conducted in casting workshops, useful models are examined for attachments for cleaning up of dust of a vacuum centralized cleaning up.

Keywords: casting, formation of dust, vacuum centralized systems, attachment for cleaning up of dust .

Шинкарьова Тетяна Анатоліївна, старший лаборант кафедри "Охорона праці та безпека життєдіяльності" Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Гедрович Анатолій Іванович, д.т.н., проф., професор кафедри "Обробка металів тиском і зварювання" Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: *Гутько Ю.І.*, д.т.н., професор, завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ).

УДК 621.833

В.П. Шишов, П.Л. Носко, А.А. Муховатый

г. Луганск

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ГЕОМЕТРО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ В ОКОЛОПОЛЮСНОЙ ЗОНЕ

Разработана методика синтеза исходного контура цилиндрических зубчатых передач с улучшенными значениями геометро-кинематических критериев в околополюсной зоне. Рис. 2, Табл. 1, Ист. 8.

Создание высоконагруженных передач зацеплением связано с нахождением геометрии рабочих поверхностей, обеспечивающей высокие значения критериев работоспособности [1...7]. В данном направлении проведены и проводятся широкие исследо-

вания с использованием различных способов отыскания рациональной геометрии зубьев [1,2,4,6,7]. Значительное количество работ посвящено синтезу рациональной геометрии зубьев по заданным значениям геометро-кинематических и комплексных критериев работоспособности [1,2,3]. Другим направлением создания зубчатых передач с высокой нагрузочной способностью является синтез геометрии зубьев зубчатых передач по заданной линии зацепления [6,7]. В данном случае необходимы дополнительные исследования по определению рациональной геометрии линии зацепления для обеспечения высоких значений критериев работоспособности. Следует заметить, что создание высоконагруженных передач можно обеспечить применением способа основанного на решении дифференциального уравнения, полученного на основе геометрических исследований условий сопряженности рабочих поверхностей [7]. Однако и этот метод не всегда приводит к получению рациональных параметров поверхностей зубьев, обеспечивающих высокие значения критериев работоспособности.

Исходя из сказанного, для нахождения рациональной геометрии поверхностей зубьев необходимо использовать значение такого параметра при синтезе, который влияет на все геометро-кинематические и комплексные критерии работоспособности и позволяют синтезировать высоконагруженные передачи.

В известных зубчатых передачах (эвольвентных, конхоидальных и др.) в околополюсной зоне некоторые геометро-кинематические критерии значительно хуже, чем на краях поля зацепления. Представляет интерес создание зубчатых передач с улучшенными значениями геометро-кинематических критериев в околополюсной зоне. Это можно получить методом изложенным ниже.

Значение приведенной кривизны определяется величиной функции [2]

$$\Omega_2' = \Omega_1' + 1, \quad (1)$$

где Ω_1' - производная функции $\Omega_1 = f_1 f_1'$;
 f_1 - функция, определяющая профиль исходного контура.

Зададим значение Ω_2' в виде функции от f_{21} , например,

$$\Omega_2' = K(f_{21}). \quad (2)$$

Можно задать $K(f_{21})$, например, в виде полинома заданной степени. Наиболее простое решение получается при $K(f_2) = k = const$. В этом случае из (1) и (2) следует

$$\Omega_1 = (k - 1) \cdot f_{21} + C_1. \quad (3)$$

С учетом значения функции Ω_1 получаем после интегрирования

$$f_1^2 = \left[(k - 1) \cdot f_{21} + C_1 \right]^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot (k - 1)} + C_2. \quad (4)$$

В (3) и (4) C_1 и C_2 - произвольные постоянные. Их можно определить, полагая в (3) и (4) $f_{21} = 0$, $f_1 = f_{10}$, а $f_{10}' = ctg \alpha_0$ (α_0 - угол профиля исходного контура в точке f_{10}).

Тогда будем иметь

$$f_1^2 = \left[(k - 1) f_{21} + f_{10} ctg \alpha_0 \right]^2 \frac{1}{(k - 1)} + f_{10}^2 - \frac{f_{10}}{(k - 1)} ctg^2 \alpha_0. \quad (5)$$

Отсюда получаем

$$f_{21} = \frac{\sqrt{(f_1^2 - f_{10}^2)(k-1) + (f_{10} \operatorname{ctg} \alpha_0)^2} - f_{10} \operatorname{ctg} \alpha_0}{k-1}. \quad (6)$$

Если в (6) положить $f_{10} = 1$, то f_{21} будет иметь значение

$$f_{21} = \frac{\sqrt{(k-1)(f_1^2 - 1) + \operatorname{ctg}^2 \alpha_0} - \operatorname{ctg} \alpha_0}{k-1}. \quad (7)$$

Из равенства (3) производная f_1' будет равна

$$f_1' = \frac{(k-1)f_{21} + \operatorname{ctg} \alpha_0}{f_1}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при $f_1 = 0$ производная $f_1' = \infty$, т.е. угол профиля исходного контура $\alpha = 0$, а функция f_2 равна (из (7))

$$f_2^0 = \frac{\sqrt{-(k-1) + \operatorname{ctg}^2 \alpha_0} - \operatorname{ctg} \alpha_0}{k-1}. \quad (9)$$

Из изложенного следует, что профиль исходного контура будет определен, если заданы α_0 и «к». При $c_1 = 0$ или $k = 1$, как следует из (3), имеем прямобочный исходный контур. Схема исходного контура представлена на рис. 1. В системе координат $X_{p1}O_pY_{p1}$ профиль исходного контура с учетом (9) будет очерчен кривой

$$f_2 = f_{21} + f_2^0, \quad (10)$$

где f_{21} имеет значение (6) или (7).

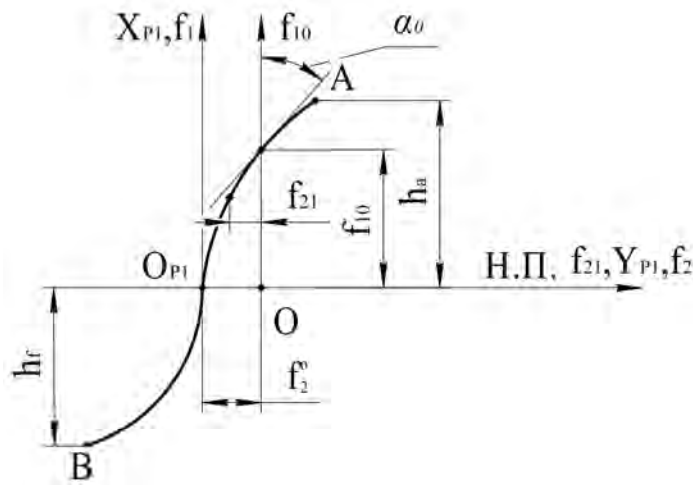


Рис. 1. Схема исходного контура

Рабочие участки профиля исходного контура (рис.1) очерчены кривой AB . В системе координат $X_{p1}O_{p1}Y_{p1}$ уравнения профилей исходного контура запишем в виде:

– участок $O_{p1}A$

$$x_{p1} = f_1; \quad (11)$$

$$y_{p1} = f_2;$$

– участок $O_{p1}B$

$$\begin{aligned}x_{p1} &= f_1; \\y_{p1} &= -f_2.\end{aligned}\tag{12}$$

В этих равенствах:

f_1, f_2 – координаты профиля исходного контура в системе координат $X_{p1}O_{p1}Y_{p1}$.

Функция f_1 изменяется в пределах $h_f \leq f_1 \leq h_a$, где h_a – расстояния точек A до начальной прямой (НП), h_f – расстояния точек B ($h_f = h_a$).

Для зубьев колес, нарезаемых со смещением к значениям функций f_1 из (11) и (12) следует прибавить ξ – коэффициент смещения. Если модуль зацепления не равен единице, значения x_{p1}, y_{p1} , следует умножить на величину модуля.

При исследовании геометрии зубьев потребуется значения производных функций f_1 и f_2 и функций $\Omega_1, \Omega_1', \Omega_2, \Omega_2'$. Полагая $f_1(f_2)$ и используя значения Ω_1 и Ω_2 из (1), (3), получаем (с учетом (8)):

– для участков профиля $O_{p1}B$ и $O_{p1}A$

$$\begin{aligned}f_1' &= \frac{(k-1)f_{21} + ctg\alpha_o}{f_1}, \\f_1'' &= \frac{(k-1) - (f_1')^2}{f_1}, \\f_2' &= 1, \\f_2'' &= 0, \\ \Omega_1 &= f_1 f_2', \\ \Omega_1' &= (f_2')^2 + f_1 f_2'', \\ \Omega_2 &= \Omega_1 + f_2, \\ \Omega_2' &= k.\end{aligned}\tag{13}$$

Используя [1] и (11) и (12), в системе координат уравнения поверхностей зубьев рейки запишем в виде:

– для участка профиля O_pA исходного контура

$$\begin{aligned}x_{n1} &= f_1, \\y_{n1} &= f_2, \\z_{n1} &= \mu;\end{aligned}\tag{14}$$

– для участка профиля O_pB исходного контура

$$\begin{aligned}x_{n1} &= -f_1, \\y_{n1} &= -f_2, \\z_{n1} &= \mu,\end{aligned}\tag{15}$$

где μ – переменный параметр;

f_2 – из соотношения (10).

С использованием [2] и (13) получаем уравнения поверхностей зубьев шестерни

$$\begin{aligned}x_1 &= (f_1 + R_1)\cos \varphi_1 + f_1 f_1' \sin \varphi_1, \\y_1 &= (f_1 + R_1)\sin \varphi_1 - f_1 f_1' \cos \varphi_1, \\z_1 &= \mu\end{aligned}\quad (16)$$

и зубьев колеса

$$\begin{aligned}x_2 &= (f_1 - R_2)\cos \varphi_2 - f_1 f_1' \sin \varphi_1, \\y_2 &= (f_1 - R_2)\sin \varphi_2 - f_1 f_1' \cos \varphi_1, \\z_2 &= \mu.\end{aligned}\quad (17)$$

В (16) и (17) φ_1, φ_2 - углы поворота шестерни и колеса; R_1, R_2 - радиусы начальных цилиндров шестерни и колеса.

Из (16) и (17) получаем значения радиусов цилиндров

$$\begin{aligned}R_{1b}^2 &= (f_1 + R_1)^2 + (f_1 f_1')^2, \\R_{2b} &= (f_1 - R_2)^2 + (f_1 f_1')^2.\end{aligned}\quad (18)$$

Из (18), находим при заданном R_{1b} и R_{2b} значения f_{11}° и f_{12}° .

Полученные значения f_{11}° и f_{12}° при $R_{1b} = R_{a1}, R_{2b} = R_{a2}$ определяют границы поля зацепления зубьев шестерни и колеса (R_{a1}, R_{a2} - радиусы вершин зубьев шестерни и колеса).

Критерии работоспособности зубчатых передач

С использованием синтезированного исходного контура получим значения метро-кинематических критериев

Скорость скольжения. Ее значение можно определить из [8] по формуле

$$V^{12} = (f_1) \frac{(u+1)}{u} \cdot \sqrt{1 + (f_1')^2}, \quad (19)$$

где f_1 имеет значения (11) и (12) и изменяется в пределах, определяемых соотношением (18).

Скорость качения поверхностей зубьев. Скорости качения будем определять с использованием [8] (11), (12) и (13) для участков $O_{p1}A$ и $O_{p1}B$ профилей исходного контура. Из указанных соотношений получаем:

– скорость качения поверхностей зубьев шестерни

$$V_1 = \frac{n}{k}(R_1 + f_1 k), \quad (20)$$

– скорость качения поверхностей зубьев колеса

$$V_2 = \frac{n}{k}(R_2 - f_1 k), \quad (21)$$

где $n = \sqrt{1 + (f_1')^2}$ - модуль нормали к поверхности зубьев рейки.

Суммарная скорость качения рабочих поверхностей.

Из [8] с использованием (11), (12) и (13) получаем

$$V_{\Sigma} = \frac{n}{k} \left[2R_1 + f_1 k \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right], \quad (22)$$

где $u = \frac{R_2}{R_1}$ - передаточное число передачи.

Приведенная кривизна. Из [8] с использованием (11), (12) и (13) значение приведенной кривизны будет равно

$$\chi = \frac{(R_1 + R_2) \cdot k^2}{\tau_1 \tau_2 n^3}, \quad (23)$$

где $\tau_1 = R_1 + f_1 k$; $\tau_2 = R_1 + f_1 k$.

Удельные скольжения. Из [8], (11), (12) и (13) следуют равенства для определения:

– удельного скольжения поверхностей зубьев шестерни

$$\eta_1 = \frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{f_1 k}{(R_1 + f_1 k)}; \quad (24)$$

– удельного скольжения поверхностей зубьев колеса

$$\eta_2 = -\frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{f_1 k}{(R_2 - f_1 k)}. \quad (25)$$

Из (24) и (25) удельные скольжения принимают бесконечно-большие значения при выполнении равенств

$$R_i \pm f_i k = 0. \quad (26)$$

В этом случае приведенная кривизна так же равна бесконечности, а скорости качения равны нулю.

Коэффициенты перекрытия. Коэффициент перекрытия из [2,8] и Ω_2 из (13) будет равен

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{|f_{11}^0 f_{11}' + f_{2a1} - f_{12}^0 f_{12}' - f_{2a2}| z_i^*}{2\pi R_1}, \quad (27)$$

где f_{11}^0, f_{12}^0 – определяемые из уравнений (18) при $R_{1b} = R_{a1}$ и $R_{2b} = R_{a2}$;
 f_{2a1}, f_{2a2} - значения функции f_2 для вершин зубьев шестерни и колеса;
 f_{11}', f_{12}' - значения производных при f_{11}^0 и f_{12}^0 .

Условие подрезания зубьев. Из [2] при использовании (13) получаем условие подрезания зубьев в виде

$$R + f_i k = 0, \quad (28)$$

где R – радиус делительной окружности шестерни (колеса).

При заданном максимальном по модулю отрицательном значении $f_1 = f_{1\max}$ минимальное значение числа зубьев из условия подрезания

$$z_{\min} = -2 f_{1\max} \cdot k. \quad (29)$$

Пример. Рассмотрим зубчатую передачу:

- число зубьев шестерни - $z_1 = 20$;
- число зубьев колеса - $z_2 = 80$;
- модуль - $m = 1$ мм;
- радиус начального цилиндра шестерни - $R_1 = 10$ мм;
- радиус начального цилиндра колеса - $R_2 = 40$ мм.

Исходные данные для синтеза исходного контура:

$$f_{10} = 1 \text{ мм};$$

$$\alpha_0 = 30^0;$$

$$k = 3,7 \frac{1}{\text{мм}}.$$

По формуле (9) значение функции f_2^0 при $f_1 = 0$ равно

$$f_2^0 = \frac{\sqrt{-(3,7-1)+ctg^2 30^0} - ctg 30^0}{3,7-1} = -0,43860 \text{ мм}.$$

При $f_1 = 0,05$ из (7) имеем

$$f_{21}^0 = \frac{\sqrt{-(3,7-1)(0,05^2-1)+ctg^2 30^0} - ctg 30^0}{3,7-1} = 0,43637 \text{ мм}$$

По формуле (10) f_2 при $f_1 = 0$ и $f_1 = 1$ равна

$$f_2 = 0,$$

$$f_2 = 0,4386.$$

Исходный контур для таких данных представлен на рис. 2.

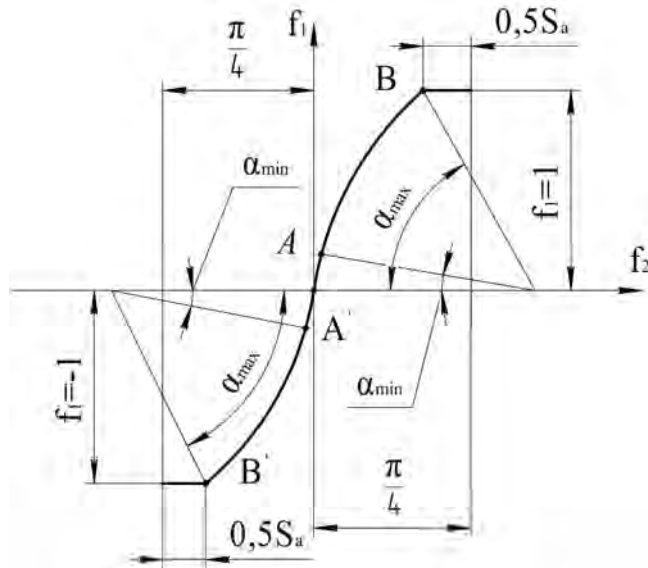


Рис. 2. Параметры синтезированного исходного контура

Профиль АВ исходного контура очерчен кривой с уравнением (10), а профиль А'В' очерчен кривой с координатой f_2 , определяемой из (10) с отрицательным знаком. Участок АА' (координата точки А $f_1 = 0,05$) очерчен прямой линией с углом профиля, равным $\alpha_{\min} = 5,2144^{\circ}$. Для этого исходного контура $\Omega_2 = 3,7$. Геометро-кинематические критерии (19), (20), (21), (22), (24), (25) синтезированной и эвольвентной передачи представлены в табл. 1.

$$(\alpha_{\max} = 30^{\circ}, \alpha_{\min} = 5,2144^{\circ}, 0,5S_a = 0,3468)$$

Т а б л и ц а 1

Геометро-кинематические критерии синтезированной и эвольвентной передач

α^0	f_1	V^{12}	V_1	V_2	V_{Σ}	$\bar{\chi}$	η_1	η_2
30	1	2,5	7,4	4,9	12,3	1,37	0,34	-0,01
		3,6	6,3	2,7	9,0	2,0	0,58	0,34
-5,2144	0,05	0,22	9,52	9,30	18,82	0,01	0,02	-0,005
		0,1	3,97	3,38	6,95	2,92	0,05	-0,0013
5,2144	-0,05	-0,22	9,17	9,39	18,6	0,01	0,02	-0,005
		-0,1	3,27	3,46	6,73	2,92	0,05	-0,013
30	-1	-2,5	3,4	5,9	9,3	2,47	0,73	-0,13
		-3,6	0,5	4,1	4,6	16,76	7,4	-0,22

Примечания:

1. В верхней строке критерии синтезированной передачи, в нижней – эвольвентной передачи при $\alpha = 20^{\circ}$.

2. $\bar{\chi} = x \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ - относительная приведенная кривизна (χ - определено для синтезированной передачи из (23)).

3. Коэффициент перекрытия синтезированной передачи $\varepsilon_{\lambda} \approx 1,38$, а эвольвентной - $\varepsilon_{\lambda} \approx 1,68$ (для синтезированной передачи ε_{λ} определен из (27)).

Из таблицы следует, что геометро-кинематические показатели синтезированной передачи существенно лучше показателей эвольвентной передачи. В большей мере они лучше в околуполосной зоне. Следовательно и комплексные критерии синтезированной передачи будут лучше, чем эвольвентной по всему полю зацепления. Только значение коэффициента перекрытия синтезированной передачи меньше, чем эвольвентной.

Выводы: 1. Разработана методика синтеза исходного контура цилиндрических передач с улучшенными значениями геометро-кинематических критериев.

2. Определены критерии работоспособности синтезированных зубчатых передач.

3. Дан пример синтеза исходного контура цилиндрических зубчатых передач.

4. Разработанная методика синтеза позволяют определять геометрию исходных контуров высоконагруженных зубчатых передач с высокими в сравнении с эвольвентными передачами значениями геометро-кинематических и комплексных критериев работоспособности.

Л и т е р а т у р а

1. Шишов В.П., Носко П.Л., Филь П.В. Теоретические основы синтеза передач зацепления. – Луганськ. Вид-во СЛУ ім. В.Даля, 2006. – 408с.

2. Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякина О.А. Цилиндрические передачи с арочными зубьями. – Луганськ. Вид-во СЛУ ім. В.Даля, 2004. – 336с.

3. Ленский М.Ф. Синтез плоских зубчатых механизмов по некоторым качественным показателям // Зубчатые и червячные передачи. – М.: Изд. Машиностроение. 1968. – С. 35-46.

4. Шабанов И.Р. О зубчатой передаче с конхоидной линией зацепления // Надежность и качество зубчатых передач. НИИ Информтяжмаш. – 18 – 67 – 106, 1967. – С. 1 – 8.
5. Носко П.Л., Шишов В.П., Ткач П.М., Муховатий О.А. Основы синтеза вихідного контуру циліндричних зубчастих передач із зменшенням питомої роботи сил тертя в зацепленні // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2010, №27. – С. 128 – 133.
6. Tokoly P., Bosancky M., Vanya A. The effect of gear geometry on the thickness of tooth face hardened eayer // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2010, №27. – С. 10 – 19.
7. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – 100с.
8. Шишов В.П., Панкратов Д.А., Муховатый А.А. Критерии оценки работоспособности передач зацеплением // Вісник національного технічного університету «ХПІ», Харків. НТУ «ХПІ». – 2001, №12. – С. 27 – 33.

References

1. Shishov V.P., Nosko P.L., Fil' P.V. Teoreticheskie osnovy sinteza peredach zacepleniem. – Lugans'k. Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2006. – 408s.
2. Shishov V.P., Nosko P.L., Revjakina O.A. Cilindricheskie peredachi s arochnymi zub'jami. – Lugans'k. Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2004. – 336s.
3. Lenskij M.F. Sintez ploskih zubchatyh mehanizmov po nekotorym kachestvennym pokazateljam // Zubchatye i chervjachnye peredachi. – M.: Izd. Mashinostroenie. 1968. – S. 35-46.
4. Shabanov I.R. O zubchatoj peredache s konhoidnoj liniej zaceplenija // Nadezhnost' i kachestvo zubchatyh peredach. NII Informtjazhmash. – 18 – 67 – 106, 1967. – S. 1 – 8.
5. Nosko P.L., Shishov V.P., Tkach P.M., Muhovatyj O.A. Osnovi sintezu vihidnogo konturu cilindrichnih zubchastih peredach iz zmeshennjam pitomoї roboti sil tertja v zacheplenni // Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI», Harkiv. NTU «HPI». – 2010, №27. – S. 128 – 133.
6. Tokoly P., Bosancky M., Vanya A. The effect of gear geometry on the thickness of tooth face hardened eayer // Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI», Harkiv. NTU «HPI». – 2010, №27. – S. 10 – 19.
7. Pavlov A.I. Sovremennaja teorija zubchatyh zaceplenij. – Har'kov: HNADU. – 2005. – 100s.
8. Shishov V.P., Pankratov D.A., Muhovatyj A.A. Kriterii ocenki rabotosposobnosti peredach zacepleniem // Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI», Harkiv. NTU «HPI». – 2001, №12. – S. 27 – 33.

В.П. Шишов, П.Л. Носко, О.А. Муховатий

Зубчасті передачі з поліпшеними значеннями геометро-кінематичних критеріїв в околополюсній зоні

Розроблено методика синтезу вихідного контуру циліндричних зубчастих передач із поліпшеними значеннями геометро-кінематичних критеріїв в околополюсній зоні. Рис. 2, Табл. 1, Дж. 8.

V. P. Shishov, P. L. Nosko, A.A. Muhovatyj

Tooth gearing with the improved values of the geometro-kinematic of criteria in a circumpolar zone

The technique of synthesis of an initial contour of cylindrical tooth gearings with the improved values of the geometro-kinematic of criteria in a circumpolar zone is developed. Fig. 2, Tab. 1, Source. 8.

В. П. Шишов – доктор технічних наук, професор кафедри «Машинovedеніе» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск);

П.Л. Носко – доктор технічних наук, професор, заведуючий кафедрою «Машинovedеніе» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск);

А.А. Муховатий – кандидат технічних наук, старший преподаватель кафедри «Машинovedеніе» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Утатов Н.Л., доктор технічних наук, професор кафедри «Машинovedеніе» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ИСХОДНОГО
КОНТУРА ЗУБЬЕВ ПРЯМОЗУБЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ПРИ
СМЕЩЕНИИ ИСХОДНОГО КОНТУРА**

Получены дифференциальные уравнения для синтеза геометрии исходного контура инструмента для нарезания зубьев цилиндрических прямозубых передач по значениям геометрико-кинематических критериев при наличии смещения. Рис. 1. Ист. 3.

В работах [1,2] получены дифференциальные уравнения для синтеза исходных контуров зубьев с криволинейной формой по длине, а так же зубьев арочных передач. В этих работах получено также дифференциальное уравнение для синтеза исходного контура по значению приведенной кривизны рабочих поверхностей зубьев прямозубых цилиндрических передач [2]. В полной совокупности дифференциальные уравнения для синтеза исходного контура зубьев прямозубых передач по значениям геометрико-кинематических критериев рассматривались в работе [3]. Однако в этой работе не учитывается смещение исходного контура.

Будем рассматривать случай, когда режущие кромки инструмента очерчены обобщенным исходным контуром с учетом смещения. Таким исходным контуром будем называть профиль зубьев рейки, очерченный произвольной плавной кривой (рис.1).

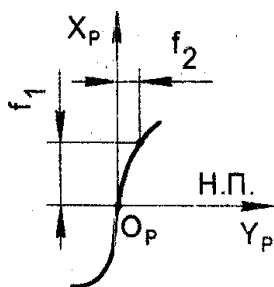


Рис.1. Профиль исходного контура

Введем систему координат $X_p O_p Y_p$, связанную профилем исходного контура (рис.1). При этом оси $O_p Y_p$ направим по начальной прямой (НП). Относительно этой системы координат уравнения профилей обобщенного исходного контура зададим в виде:

– для профиля, расположенного выше начальной прямой (в параметрической форме):

$$\begin{aligned} x_p &= f_1(\lambda), \\ y_p &= f_2(\lambda), \end{aligned} \quad (1)$$

– для профиля, расположенного ниже начальной прямой (в параметрической форме):

$$\begin{aligned} x_p &= -f_1(\lambda), \\ y_p &= -f_2(\lambda), \end{aligned} \quad (2)$$

где $f_1(\lambda), f_2(\lambda)$ – произвольные необходимое число раз дифференцируемые функции;
 λ – переменная величина (параметр).

Если в уравнениях (1) и (2) исключить параметр λ , то получаем уравнения профилей исходного контура в явном виде. В этом случае будем иметь соотношения вида

$$y_p = y_p(x_p) = f_2(f_1). \quad (3)$$

Знаки в правой части (3) определяются в соответствии с уравнениями (1) и (2). Кроме того, будем принимать в точках профиля исходного контура, расположенных на равном расстоянии от начальной прямой в положительном и отрицательном направлениях оси $O_p X_p$ (рис.1), касательные к профилю параллельны, т.е. профильные углы в соответствующих точках должны быть равны между собой. Профильный угол α инструмента с обобщенным исходным контуром определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \alpha = \pm \frac{f_2'(\lambda)}{f_1'(\lambda)}, \quad (4)$$

где $f_1'(\lambda), f_2'(\lambda)$ – первые производные функций $f_1(\lambda), f_2(\lambda)$.

В дальнейшем будем рассматривать случай $f_2 = f_2(f_1)$.

Из соотношения (4) следует, что в случае обобщенного исходного контура профильный угол инструмента вообще говоря, величина переменная.

Ниже приведены дифференциальные уравнения для синтеза геометрии исходного контура инструмента для нарезания прямозубых колес по заданной линии зацепления, по заданной относительной скорости, по заданным скоростям качения, по заданным удельным скольжениям при смещении исходного контура. При этом принято, что функция $f_2 = f_2(f_1)$, а $f_1' = 1; f_1'' = 0$.

Используя результаты работ [1,2] получаем дифференциальные уравнения для синтеза геометрии исходного контура при наличии смещения:

– по заданной линии зацепления:

$$f_2' = -\frac{f_1 + \xi}{y}; \quad (5)$$

– по заданному значению относительной скорости (при $f_2 = f_2(f_1)$):

$$f_2^1 = \frac{1}{\left\{ \left[\frac{V_{ск} \cdot u}{(u+1)} \right]^2 - 1 \right\}^{0,5}}, \quad (6)$$

где $V_{ск}$ – скорость скольжения;

u – передаточное число;

– по заданным значениям скоростей качения:

$$f_2'' = \frac{f_2' - A_v (f_2')^2 + (f_2')^3}{f_1 + \xi} \quad (7)$$

где f_2'' – вторая производная функции f_2 по f_1 ;

$$A_v = \frac{n \cdot R_i}{V_i \pm \frac{n(f_1 + \xi)'}{f_2'}},$$

$$n = \sqrt{1 + (f_2')^2},$$

где V_i – скорость качения поверхностей зубьев колес ($i=1$ и знак минус – для шестерни, $i=2$ и знак плюс – для колеса);

R_i – радиусы начальных цилиндров шестерни и колеса.

Если в соотношении (7) произвести замену $\zeta = \sin \alpha$ (α – текущий угол профиля исходного контура), то получаем дифференциальное уравнение:

$$\zeta' = \frac{\zeta \left(1 - \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} A_{v\zeta} \right)}{f_1 + \xi}, \quad (8)$$

где ζ' – первая производная функции ζ по f_1 :

$$A_{v\zeta} = \frac{R_i}{\sqrt{1 - \zeta^2} \left(V_i - \frac{f_1 + \xi}{\zeta} \right)},$$

– по заданному значению скорости качения V_Σ :

$$f_2'' = \frac{f_2' - A_{v\Sigma} (f_2')^2 + (f_2')^3}{f_1 + \xi} \quad (9)$$

где $A_{v\Sigma} = \frac{2nR_1}{V_\Sigma - \frac{(f_1 + \xi)n}{f_2'} \left(1 - \frac{1}{u} \right)}$; u – передаточное число передачи $\left(u = \frac{R_2}{R_1} \right)$.

При замене:

$$\zeta' = \frac{\zeta \left(1 - \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} A_{\Sigma\zeta} \right)}{f_1 + \xi}, \quad (10)$$

где $A_{\Sigma v} = \frac{2R_1}{\sqrt{1 - \zeta^2} \left[V_\Sigma - \frac{f_1 + \xi}{\zeta} \left(1 - \frac{1}{u} \right) \right]}$;

– по заданному значению относительной приведенной кривизны поверхностей зубьев:

$$f_2'' = \frac{f_2' + (f_1')^3}{-(f_1 + \xi)} + \frac{(f_1')^2 \left(B_x \mp \sqrt{B_x^2 - 4A_n C_x} \right)}{2A_x (f_1 + \xi)}, \quad (11)$$

где $A_x = -\frac{\bar{f}_1^2 \bar{x} n^3}{u(f_2')^2} - f_2'$;

$$B_x = \frac{\bar{f}_1}{f_2'} \left(1 - \frac{1}{u}\right) \bar{x} n^3;$$

$$C_x = \bar{x} n^3;$$

$$\bar{x} = \frac{xR_1R_2}{R_1 + R_2} \text{ – относительная приведенная кривизна;}$$

x – приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев.

При замене $\zeta = \sin \alpha$ и больших значениях R_1 и R_2 из (11) получаем дифференциальное уравнение:

$$\zeta' = \frac{\zeta(1 - \sqrt{\bar{x}\zeta})}{f_1 + \xi}; \quad (12)$$

– по заданному значению удельных скольжений η_i ($i=1$ – для шестерни, $i=2$ – для колеса):

$$f_2'' = \frac{f_2' - A_\zeta (f_2')^2 + (f_2^1)^3}{f_1 + \xi} \quad (13)$$

где $A_\zeta = -\frac{\zeta_{iu} f_2'}{f_i(1 \pm \zeta_{iu})}$;

$$\zeta_{iu} = \pm \frac{u}{u+1} \zeta_i;$$

$$\bar{f}_1 = \frac{f_1 + \xi}{R_1};$$

$$\bar{f}_2 = \frac{f_1 + \xi}{R_2}.$$

При замене $\zeta = \sin \alpha$ из (13) получаем дифференциальное уравнение:

$$\zeta' = \frac{\bar{f}_i \zeta (1 \mp \zeta_{iu}) - \zeta_{iu} \zeta^3}{(f_1 + \xi) f_i}. \quad (14)$$

В приведенных уравнениях ξ – смещение исходного контура.

Задавая значение геометро-кинематического критерия из (6) – (13) находим геометрические параметры профиля исходного контура реечного инструмента.

В качестве примера рассмотрим решение уравнения (12) при $\bar{x} = \text{const}$. Функцию f_2 запишем в виде:

$$f_2 = f_{20} + f_{20}'((f_1 + \xi) - f_{10}) + \frac{f_{20}''}{2}((f_1 + \xi) - f_{10})^2 + \frac{f_{20}'''}{3}((f_1 + \xi) - f_{10})^3 \dots, \quad (15)$$

где $f_{20}, f_{20}', f_{20}'', f_{20}'''$ – значения функции f_2 и ее производных в точке f_{10} .

В зависимости от $\zeta_0 = \sin \alpha_0$ в точке f_{10} имеем:

$$\begin{aligned}
 f'_{20} &= \frac{\zeta_0}{\sqrt{1-\zeta_0^2}}, \\
 f''_{20} &= \frac{\zeta_0'}{(1-\zeta_0^2)^{1.5}}, \\
 f'''_{20} &= \frac{\zeta_0''(1-\zeta_0') + 3\zeta_0(\zeta_0')^2}{(1-\zeta_0^2)^{2.5}}, \\
 \zeta_0' &= \frac{\zeta_0(1-\sqrt{x\zeta_0})}{f_1 + \xi}; \\
 \zeta_0'' &= \frac{-\frac{3}{2}x^{-0.5}\zeta_0^{0.5}\zeta_0'}{f_1 + \xi}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где

$$\begin{aligned}
 \zeta_0' &= \frac{\zeta_0(1-\sqrt{x\zeta_0})}{f_1 + \xi}; \\
 \zeta_0'' &= \frac{-\frac{3}{2}x^{-0.5}\zeta_0^{0.5}\zeta_0'}{f_1 + \xi}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Точность решения обеспечивается количеством членов ряда (15). Значения производных высшего порядка можно получить последовательным дифференцированием последних равенств (16) и (17).

Вывод: получены дифференциальные уравнения для определения геометрии исходного контура инструмента для нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес по значениям скорости скольжения, скоростей качения рабочих поверхностей зубьев зацепляющихся колес, суммарной скорости качения, приведенной кривизны и удельных скольжений при наличии смещения исходного контура.

Л и т е р а т у р а

1. Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякина О.А. Цилиндрические передачи с арочными зубьям» - Луганск: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2004. - 336 с.
2. Шишов В.П., Носко П.Л., Филь П.В. Теоретические основы синтеза передач зацеплением,- Луганск: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2006.-408 с.
3. Шишов В.П., Муховатый А.А, Скляр Ю.А. Дифференциальные уравнения для синтеза исходного контура зубьев прямозубых передач по значениям геометро-кинематических критериев, - Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №3 (145). Частина 2. – Луганск: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. – С. 129-134.

References

1. Shishov V.P., Nosko P.L., Revjakina O.A. Cilindricheskie peredachi s arochnymi zub'jam» - Lugans'k: Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2004. - 336 s.
2. Shishov V.P., Nosko P.L., Fil' P.V. Teoreticheskie osnovy sinteza peredach zacepleni-em,- Lugan'sk: Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2006.-408 s.
3. Shishov V.P., Muhovatyj A.A, Skljар Ju.A. Differencial'nye uravnenija dlja sinteza ishodnogo kontura zub'ev prjamozubyh peredach po znachenijam geometro-kinematiceskikh kriteriev, - Visnik shidnoukraїnskogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja №3 (145). Chastina 2. – Lugans'k: Vid-vo SNU im. V. Dalja, 2010. – S. 129-134.

В.П. Шишов, П.Л. Носко, О.А Муховатий, Ю.О. Скляр

Диференціальні рівняння для синтезу вихідного контуру зубів прямозубих циліндричних передач при зсуві вихідного контуру

Отримано диференціальні рівняння для синтезу геометрії вихідного контуру інструмента для нарізання зубів циліндричних прямозубих передач за значеннями геометро - кінематичних критеріїв при наявності зсуву. Рис. 1. Дж. 3.

V.P. Shishov, P.L. Nosko, A.A. Muhovatyj, U.A. Sklyar
The Differential equations for synthesis of an initial contour of teeth straight lines cylindrical transfers at displacement of an initial contour

The differential equations for synthesis of geometry of an initial contour of the tool for cutting teeth cylindrical straight lines transfers on values of the geometric kinematic of criteria in the presence of displacement are received. Fig. 1. Source. 3.

В. П. Шишов – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

П. Л. Носко - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

А. А. Муховатый - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Ю. А. Скляр - ассистент кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Утумов Н.Л., доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведение» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 621.9.022

В.А. Плахотник, Л.Д. Мелконов, Г.Л. Мелконов

г. Луганск

МЕХАНИЗМ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОМ РЕЗАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ

Представлена идеализированная схема срезания и схода стружки по передней поверхности инструмента с касательным движением режущего лезвия. Показаны отличительные особенности механизма стружкоформирования и определения его параметров в сравнении с традиционным резанием. Определена возможность регулирования интенсивности срезания стружки, а следовательно и основных характеристик протекания процесса за счет изменения геометрии расположения режущей кромки диска резания относительно вектора скорости главного движения и боковых сторон срезаемого слоя как при косоугольном так и при прямоугольном резании.

Ключевые слова: стружка, стружкообразование, срезаемый слой, диск резания, режущая кромка, кинематический угол, угол ориентации, параметры резания.

При термофрикционном резании дисками трения наличие высокой температуры в контактной зоне и дополнительного перемещения лезвия диска вдоль режущей кромки приводит к изменению справедливых для обычного резания закономерностей стружкообразования предопределяющих основные параметры протекания процесса в целом [2,3,4]. Установление этих закономерностей актуально с точки зрения возможности объяснения физической сущности особенностей термофрикционного резания, практическое значение которых раскрыто далеко не полностью.

Этот довольно необычный процесс (Рис.1) может быть сведен к более упрощенной схеме, если действие инструмента 1 рассмотреть относительно постоянной точки на обрабатываемой детали 2, которая в процессе обработки представляется неподвижной, а инструмент совершает главное движение резания V_s и касательное перемещение вдоль собственной режущей кромки V_d . При этом относительное перемещение любой точки режущей кромки по поверхности резания происходит в направлении суммарного вектора \vec{V}_e [4.5.6]. кроме того процесс предполагается рассматривать как процесс свободного резания равномерно нагретого до высокой температуры металла заготовки в контактной зоне инструментом с прямолинейной регулирующей кромкой обеспечивающей во всех её точках постоянство скоростных и геометрических параметров, а также одинаковых

толщин срезаемого слоя. Такое допущение можно считать правомерным учитывая, что при диаметрах регулирующего диска $Dd=450... 500$ мм и относительном отношении $B/Dd=0,2$ поверхности резания, без большой погрешности, может быть представлена плоскостью, а круговая регулирующая кромка – прямой. При этом разность длин режущих кромок не превышает 0,7 мм и может быть компенсирована поворотом её на статический угол λ .

На основании принятых допущений можно получить идеализированную схему срезания стружки для общего слоя резания с касательным движением лезвия инструмента (Рис. 2), которая тождественна варианту строгания широким резцом в направлении вектора V_s заготовки шириной B с равномерно нагретой до высокой температуры контактной зоны, боковые стороны которой расположены под углом δ к вектору скорости результирующего движения резания.

В процессе перемещения фиксированной точки m режущей кромки в конечное положение P за время контакта τ_k , срезанная стружка движется по передней поверхности инструмента со скоростью V_c под углом γ , зависящим, как известно, при традиционном резании, в основном, от кинематического угла наклона режущей кромки λ_k . Если считать, что обрабатываемый материал абсолютно недеформируемый, то при перемещении инструмента из положения I в положение II развернутся на передней грани лезвия контактная поверхность срезаемой стружки представляла бы собой параллелограмм $mnpq$ с основанием, равным рабочей длине B_k режущей кромки, и диагональю, равной пути резания, т.е. расстоянию L между положениями режущей кромки, измеренному в направлении вектора V_c . Боковые стороны параллелограмма составили с режущей кромкой угол равный углу ξ между векторами V_d и V_s .

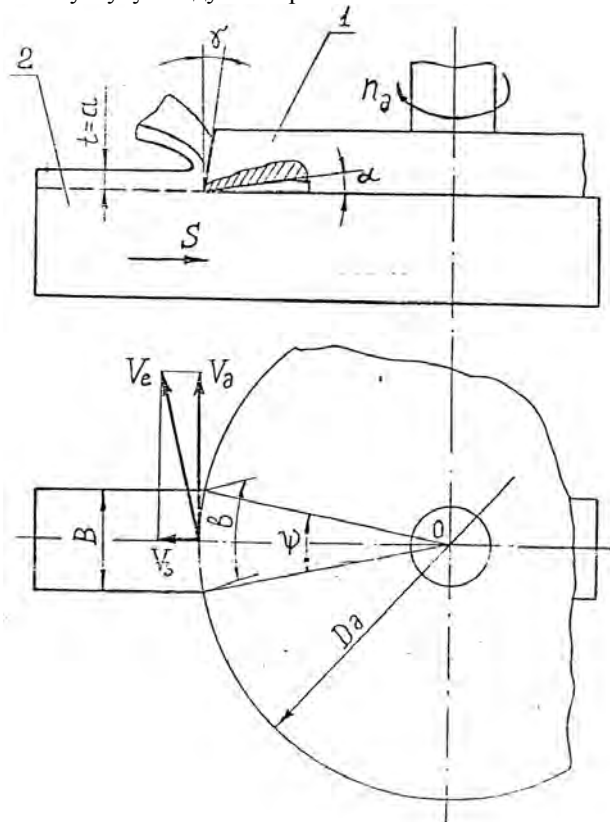


Рис. 1. Схема термофрикционного резания плоских деталей

При традиционном резании реального материала, согласно А.А. Бриксу [1,8], слой металла, деформируясь по плоскости сдвига, вызовут укорочение срезаемого слоя в

Несовпадение направлений схода и ориентации стружки при резании с касательным перемещением рабочих участков лезвия инструмента обуславливается наличием угла δ между вектором скорости обработки V_s и вектором истинной скорости резания V_e . Величина числа угла ориентации зависит также от степени деформации стружки. Характеризующейся при резании трансформацией параллелограмма $mnpq$ (рис. 2) в параллелограмм $m'n'p'q'$.

Как следует из приведенной схемы

$$\operatorname{ctg} \rho = \frac{Pd}{n \cdot d'}$$

где $Pd = B_k - Ll \sin \gamma$; $n \cdot d' = L \cdot \cos \gamma$

Таким образом

$$\rho = \operatorname{arcctg} \left(\frac{B_k}{L \cdot \cos \gamma} - \operatorname{tg} \gamma \right)$$

Углом ρ является одним из важных параметров процесса термофрикционного резания с касательным движением лезвия инструмента, поскольку в отличие от традиционного резания именно он, а не угол γ схода стружки по передней поверхности, определяет направление потока стружки по отношению к поверхности резания.

Анализ схемы срезания стружки, представленной на рис.2, позволяет сделать вывод о том, что основной особенностью, отличающей её от случаев традиционного резания, является значительное несовпадение боковых сторон срезаемого слоя, положение которых определяется вектором скорости главного движения резания V_s , с направлением результирующего движения резания, совпадающим с вектором V_e перемещение точек режущей кромки инструмента относительно обрабатываемого материала. Параметром, определяющим эту особенность, является угол δ между векторами V_s и V_e , который характеризует направление срезания стружки по отношению к боковым сторонам срезаемого слоя и может быть назван углом среза. Влияние угла δ на характеристики термофрикционного резания до сих пор практически не исследовались, что не позволяет с достаточной степенью ясности раскрыть сущность процесса и обосновать основные закономерности и особенности его протекания.

Наклонное к вектору V_e расположение боковых сторон срезаемого слоя предопределяет отсутствие характерной для традиционного резания однозначной взаимосвязи между кинематическим углом λ_k наклона режущей кромки к вектору результирующей кромки к вектору результирующей скорости резания и углом ξ её наклона к боковым сторонам срезаемого слоя. Если при обычном резании $\lambda_k = 90 - \delta$. Последнее обстоятельство делает целесообразным рассмотрение следующих видов резания инструмента.

1. Анализируя схему стружкообразования (Рис. 2), можно представить, что при определенных условиях вектор V_e может занять положение, перпендикулярное боковым сторонам срезаемого слоя т.е. вектору V_s ($\delta = 90$, $\lambda_k = 0$). Этим условием при заданном угле ξ наклона вектора V_s к режущей кромке соответствует перемещение последней со скоростью $V_d = V_s / \cos \xi$ в направлении обратном тангенциальной составляющей вектора (Рис 3,а).

Такой случай обработки можно назвать прямоугольным резанием с касательным движением лезвия инструмента. Важной его особенностью является тот факт, что при заданной величине скорости V_s в рассматриваемом случае обеспечивается минимальное из возможных γ_k любого заданного угла ξ значение скорости результирующего движения резания $V_L = V_d \sin \xi$ определяющей интенсивность срезания стружки и оказывающей влияние на основные характеристики протекания процесса в целом.

2. В общем случае резания, показанном на рис. 2, вектор скорости результирующего движения V_e расположен наклонно под углом $\lambda_k \neq 0$ к режущей кромке, инструмента, которая, в свою очередь, расположена под углом $\xi \neq 90$ к вектору главного движения V_s и боковым сторонам срезаемого слоя. Такой случай обработки представляет косоугольное резание с касательным движением лезвия инструмента.

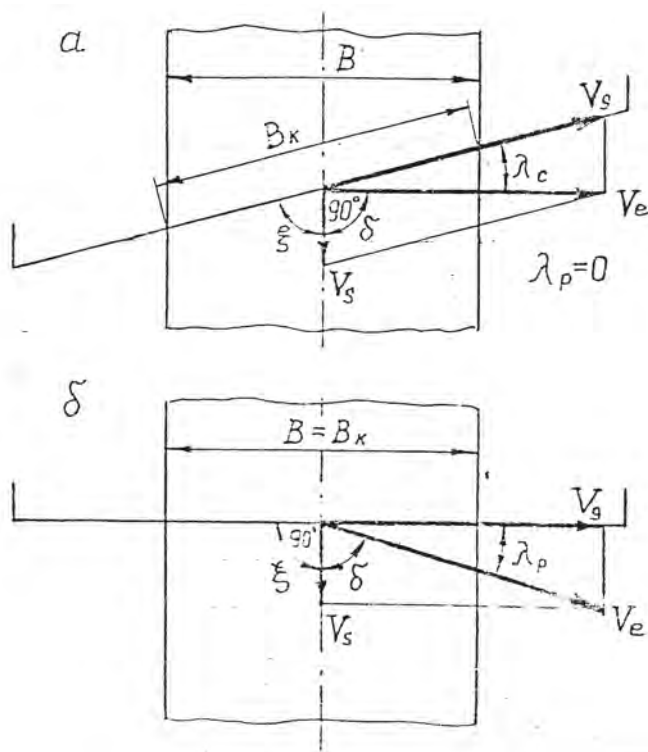


Рис 3. Схема резания с касательным движением лезвия режущего диска.

3. Из анализа схемы (рис. 2), можно также установить, что при резании с перемещением участков лезвия инструмента ширина B_k рабочего участка режущей кромки при заданной ширине среза B зависит не от кинематического угла наклона режущей кромки λ_k , как это имеет место при обычном резании, а от величины угла ξ между режущей кромкой и боковыми сторонами срезаемого слоя ($B_k = B / \sin \xi$), изменяя который можно варьировать значениями ширины активного участка режущей кромки не только при косоугольном резании, но даже в случае прямоугольного резания, соответственно изменяя силовые и мощностные характеристики процесса зависящие от величины B_k .

Условие минимального значения ширины лезвия ($B_k = B$) при любой заданной ширине срезаемого слоя соответствует угол $\xi = 90^\circ$, обеспечивающий ортогональное расположение регулирующей кромки к вектору V_s и боковым сторонам срезаемого слоя (рис 3,б). Следует отметить, что если при традиционных видах обработки режущая кромка инструмента располагается перпендикулярно к боковым сторонам срезаемого слоя только при прямоугольном резании, то для рассматриваемого случая срезания стружки, как это видно из анализа рис 3,б, условие ортогонального расположения режущей кромки достижимо лишь для случаев косоугольного резания при $\lambda \neq 0$. Поэтому при выполнении условия $\xi = 90^\circ$ рассматриваемый резанием с касательным движением лезвия инструмента и ортогональным расположением режущей кромки к боковым сторонам срезаемого слоя.

Л и т е р а т у р а

1. Лоладзе Т.Н. Стружкообразование при резании металлов/Т.Н.Лоладзе-М.:Машиностроение, 1952.-200с.
2. Бобров В.Ф. основы теории резания металлов/ В.Ф.Бобров-М.: Высшая школа,1985.-304с.

3. Зарубицкий Е.У. Обработка плоскостей дисками трения/ Е.У. Зарубицкий.- Судостроение, 1983-№10с. 39-40.
4. Зарубицкий Е.У. Исследование процесса стружкообразования при обработке металлов диском трения/ Е.У. Зарубицкий, Н.В. Талантов, Т.П. Костина// Вестник машиностроения, 1981-№9-с.57-58
5. Зарубицкий Е.У. Модель стружкообразования при термофрикционном резании/Е.У. Зарубицкий, Т.П. Костина, В.А. Плахотник// Исследование процессов резания и холодного пластического деформирования металлов. Труд АН Украины, НСМ-К.:1994 с.72-74
6. Зарубицкий Е.У. Определение длины контакта стружки с передней поверхности инструмента при термофрикционном резании/ Е.У. Зарубицкий, В.А. Плахотник, Н.И. Покинтеница// Физические процессы при резании металлов. Изд. ТУ, Волгоград- 1994 с 10-12.
7. Плахотник В.А. Исследование процесса стружкообразования при обработке коррозионно-стойких сталей диском трения/ В.А. Плахотник, Ю.А. Камзолова// Сборник научных трудов механического факультета. Изд. СХУ им. Владимира Даля-2007-с.147-149.
7. Грамовский Г.Н. Резание металлов/Г.Н. Грановский, В.Г. Грановский-М.:Высшая школа,1985.-304с.

References

1. Loladze T.N. Struzhkoobrazovanie pri rezanii metallov/T.N.Loladze-M.:Mashinostroenie, 1952.-200s.
2. Bobrov V.F. osnovy teorii rezanija matallov/ V.F.Bobrov-M.: Vysshaja shko-la,1985.-304s.
3. Zarubickij E.U. Obrabotka ploskostej diskami trenija/ E.U. Zarubickij.-Sudostroenie, 1983-№10s. 39-40.
4. Zarubickij E.U. Issledovanie processa struzhkoobrazovanija pri obrabotke metallov diskom trenija/ E.U. Zarubickij, N.V. Talantov, T.P. Kostina// Vestnik ma-shinostroenija, 1981-№9-s.57-58
5. Zarubickij E.U. Model' struzhkoobrazovanija pri termofrikcionnom reza-nii/E.U. Zarubickij, T.P. Kostina, V.A. Plahotnik// Issledovanie processov rezanija i holodnogo plasticheskogo deformirovaniya metallov. Trud AN Ukrainy, NSM-K.:1994 s.72-74
6. Zarubickij E.U. Opredelenie dliny kontakta struzhki s perednej poverhnosti instrumenta pri termofrikcionnom rezanii/ E.U. Zarubickij, V.A. Plahotnik, N.I. Pokintenica// Fizicheskie processy pri rezanii metallov. Izd. TU, Volgograd- 1994 s 10-12.
7. Plahotnik V.A. Issledovanie processa struzhkoobrazovanija pri obrabotke korrozionno-stojkih stalej diskom trenija/ V.A. Plahotnik, Ju.A. Kamzolova// Sbornik nauchnyh trudov mehanicheskogo fakul'teta. Izd. SNU im. Vladimira Dalja-2007-s.147-149.
7. Gramovskij G.N. Rezanie metallov/G.N. Granovskij, V.G. Granovskij-M.:Vysshaja shkola,1985.-304s.

Плахотник В.А., Мелконов Л.Д., Мелконов Г.Л.

Механізм стружкоутворення при термофрикційному різанні плоских поверхонь деталі

Представлено ідеалізовану схему зрізання й сходу стружки по передній поверхні інструмента з дотичним рухом ріжучого леза. Показано відмінні риси механізму стружкоутворення й визначення його параметрів у порівнянні із традиційним різанням. Визначено можливість регулювання інтенсивності зрізання стружки, а отже й основних характеристик протікання процесу за рахунок зміни геометрії розташування ріжучої крайки диска різання щодо вектора швидкості головного руху й бічних сторін зрізує слоя, що, як при косокутному так і при прямокутному різанні.

Ключові слова: стружка, стружкоутворення, що зрізує шар, диск різання, що ріже крайка, кінематичний кут, кут орієнтації, параметри різання.

Plahotnik V.A., Melkonov L.D., Melkonov G.L.

The mechanism of chip formation in cutting of flat surfaces termofriktsionnom details

Represented by an idealized scheme cutting and chip flow on the front surface of the tool with tangential movement of the cutting blade. Shows the distinctive features of the mechanism struzhkoformirovaniya and determining its parameters as compared with traditional machining. The possibility of regulating the intensity of cutting chips and, consequently, the main characteristics of the process by changing the geometry of the arrangement of cutting edge cutting disk relative velocity of the main motion and the sides of cut as in the oblique angle and at a right-angled cutting.

Keywords: chip, chip, cut layer disc cutting, cutting edge, the kinematic angle, the angle of orientation, cutting parameters.

Мелконов Г.Л. – старший викладач Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ);

Мелконов Л.Д. – канд. техн. наук, доцент Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ);

Плахотнік В.А. - канд. техн. наук, доцент Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Гутько Ю.І., д.т.н., професор, завідувач кафедри промислового та художнього литва Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

УДК 621.9.048.6

Г.Л. Мелконов, Л.Д. Мелконов, В.А. Плахотнік

г. Луганск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ 4-Х ШПИНДЕЛЬНОЙ ШЛИФО-ПОЛИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Предложена математическая модель, кинематического движения исполнительных органов 4-х шпиндельной шлифо-полировальной машины, осуществляющая связь между движением заготовки и сыпучим наполнителем.

Ключевые слова: математическая модель, кинематическая связь между заготовкой и сыпучим наполнителем.

Создание математической модели кинематики движения исполнительных органов любого металлорежущего оборудования является основной целью. Которая позволит заложить фундамент для дальнейших исследований. В разработанной математической модели должны быть учтены такие показатели как: скорость резания, подача, глубина и сила резания. Выведенные математические зависимости позволят управлять процессом обработки. Результатом управления этим процессом будет являться выход на качество обработанной поверхности.

Отличительной особенностью обработки заготовок на 4-х шпиндельной шлифо-полировальной машине является относительное «скольжение» режущего лезвия вращающегося чашечного резца абразивного наполнителя вдоль образующих обрабатываемой цилиндрической заготовки. В этом случае подача представляет собой относительное «скольжение», осуществляемое суппортом, и является независимой от главного движения. Она должна быть меньше величины относительного «скольжения», так как в противном случае обрабатываемая поверхность будет иметь вид винтовой поверхности.

Из сказанного следует, что при шлифо-полировании на 4-х шпиндельной машине с обрабатываемой заготовкой режущей кромки абразивного наполнителя образуют производящую поверхность. Рассмотрим образование производящей поверхности. Вводим неподвижную систему координат $S(XYZ)$, относительно которой задаем положением подвижных систем $S_1(X_1Y_1Z_1)$ и $S_2(X_2Y_2Z_2)$, связанных соответственно с обрабатываемой цилиндрической заготовкой и искомой производящей поверхностью.

Оси O_1Z_1 и O_2Z_2 являются осями вращения соответственно обрабатываемой заготовки и производящей поверхности: γ_C - угол скрещивания осей; A - кратчайшее межосевое расстояние.

Запишем поверхность обрабатываемой заготовки вала в подвижной системе координат $(X_1Y_1Z_1)$ (движение показано против часовой стрелки), принимая, что она очерчена главной кривой вида

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(\lambda) \\ Y_1 &= f_2(\lambda) \\ Z_1 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

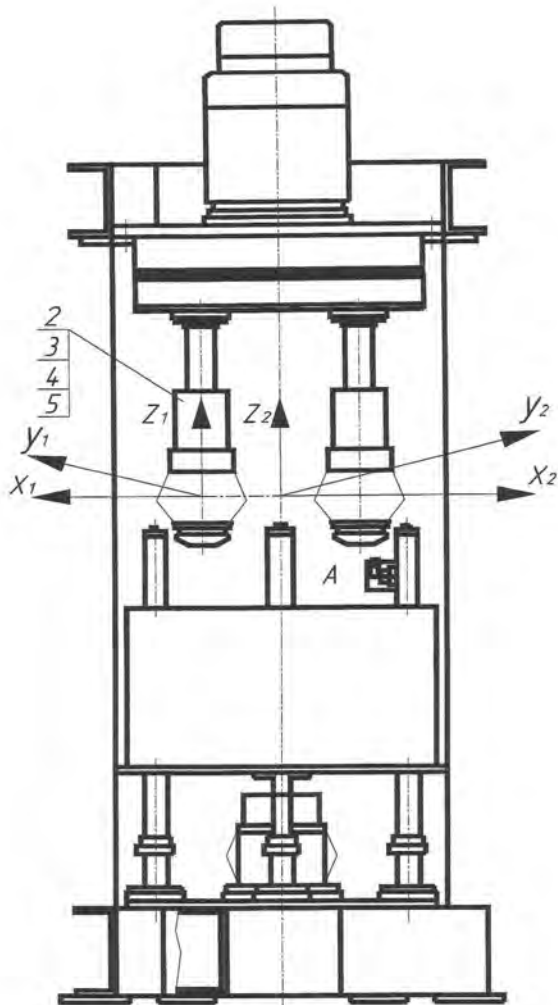


Рис. 1

Движение кривой (1) образует поверхность заготовки вала вдоль образующего цилиндра

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(\lambda) = R \cos \lambda \\ Y_1 &= f_2(\lambda) = R \sin \lambda \\ Z_1 &= M \end{aligned} \quad (2)$$

где $f_1(\lambda)$ $f_2(\lambda)$ - произвольные, необходимое число раз дифференцируемые функции;
 λ - переменная величина
 R - радиус обрабатываемого вала
 M - расстояние по оси Z от координатной плоскости XY .

При обработке шлифо-полировальным методом совершает движение, определяемое параметрами μ и ϕ_2 , где ϕ_2 - угол поворота заготовки относительно O_1Z_1

Для установления связи между системами координат S_1 и S_2 необходимо осуществить переход от заготовки (система координат $X_1Y_1Z_1$) к наполнителю, который находится в подвижной системе координат $X_2Y_2Z_2$. Используя метрический метод, перейдем от системы S_1 к промежуточной системе XYZ . Поверхность вала запишется в неподвижной системе координат в следующем виде

$$\begin{aligned} X &= X_1 \cos \phi_1 - Y_1 \sin \phi_1 \\ Y &= Y_1 \sin \phi_1 + X_1 \cos \phi_1 \\ Z &= Z_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Далее, с помощью математических преобразований, перейдем в промежуточную систему $X_p Y_p Z_p$ (рис 1). Уравнение поверхности вала в промежуточной системе впишется в следующем виде

$$\begin{aligned} X_p &= X_1 \cos \phi_1 - Y_1 \sin \phi_1 + A \\ Y_p &= X_1 \sin \phi_1 + Y_1 \cos \phi_1 - Z \sin Y \\ Z_p &= (X_1 \sin \phi_1 + Y_1 \cos \phi_1) \sin Y + Z \cos Y \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда поверхность наполнителя будет описана следующим выражением

$$\begin{aligned} X_2 &= X_p \cos \phi_2 + Y_2 \sin \phi_2 \\ Y_2 &= -X_p \sin \phi_2 + Y_2 \cos \phi_2 \\ Z_2 &= Z_p \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя в выведенное уравнение (5) полученные ранее выражения (2),(3),(4), получим уравнение семейства производных поверхностей в следующем виде

$$\begin{aligned} x_2 &= f_1(\lambda) (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma_c \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + \\ &+ f_2(\lambda) (\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma_c \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 - \mu \sin \gamma_c \sin \varphi_2 + A \cos \varphi_2) \\ y_2 &= f_1(\lambda) (-\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma_c \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) + \\ &+ f_2(\lambda) (\sin \varphi_2 + \cos \gamma_c \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma_c \cos \varphi_2 - A \sin \varphi_2 \\ z_2 &= f_2(\lambda) \sin \gamma_c \sin \varphi_1 + f_2 \sin \gamma_c \cos \varphi_1 + \mu \cos \gamma_c \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой семейство поверхностей, определяемой независимыми параметрами λ , μ и ϕ_1 . Параметр ϕ_2 (угол поворота производящей поверхности) заменяем параметром ϕ_1 и передаточным числом U_{21} , представляющим собой отношение угловых скоростей производящей поверхности и полируемой заготовки.

Для получения производящей поверхности в уравнения (6) необходимо исключить один из независимых параметров λ , μ или ϕ_1 , сделать их взаимозависимыми. С этой целью к уравнению (6) следует составить еще одно уравнение связи. Принимаем следующее положение: в точке (или линии) касания взаимоогibaемых поверхностей вектор скорости относительного движения должен быть перпендикулярен вектору нормали

Следовательно

$$\vec{N} \cdot \vec{v}^{(12)} = 0 \quad (7)$$

где \vec{N} - вектор нормали соприкасающихся поверхностей обрабатываемой заготовки и производящей поверхности;

$\vec{v}^{(12)}$ - вектор относительной скорости;

Для определения нормали \vec{N} (рис 2) запишем уравнение поверхности заготовки (2) в векторном виде

$$\Gamma(\lambda, \mu) = R \cos \lambda \cdot \vec{r} + \mu \quad (8)$$

Взяв частные производные по независимым переменным параметрам λ и μ , найдем соответствующие к заданной обработанной поверхности заготовки.

Частная производная по параметру λ примет следующий вид

$$\vec{\Gamma}^\lambda = -R \sin \lambda \cdot \vec{L} + R \cos \lambda \vec{J} \quad (9)$$

Частная производная по параметру μ запишется в виде

$$\vec{\Gamma}^\mu = K \quad (10)$$

Произведение векторных величин в уравнение (9) и (10) дает нам нормаль \vec{N}

$$\vec{N} = \left[\vec{\Gamma}^\lambda \times \vec{\Gamma}^\mu \right]$$

Запишем произведение в координатной форме

$$\left[\vec{\Gamma}^\mu \times \vec{\Gamma}^\lambda \right] = \begin{vmatrix} N_x N_Y N_Z \\ Z_X^\lambda Z_Y^\lambda Z_Z^\lambda \\ Z_X^\mu Z_Y^\mu Z_Z^\mu \end{vmatrix} \quad (11)$$

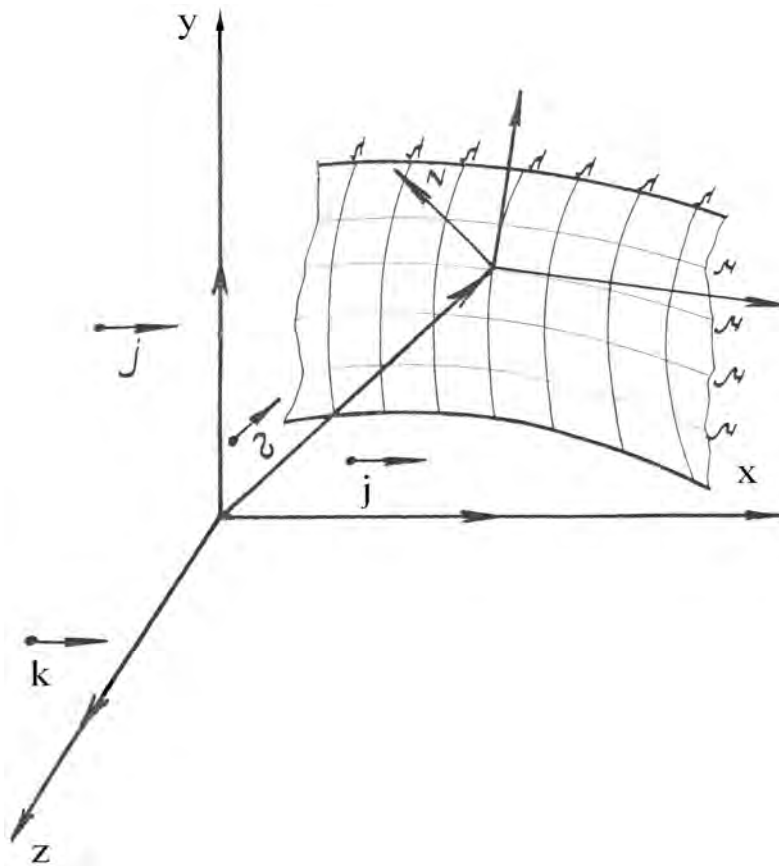


Рис.2. Взаимосвязь вектора нормали \vec{N} и вектора относительной скорости $\vec{V}^{(12)}$ на поверхности заготовки вала

После ряда преобразований получим уравнение нормали, являющейся скалярной величиной

$$\begin{aligned} N_x &= R \cos \lambda \\ N_y &= -R \sin \lambda \\ N_z &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Вектор относительной скорости $\vec{V}^{(12)}$ определится из уравнения (7), то есть скольжение точки, жестко связанной со звеном 1 (заготовкой), то есть скольжение точки, жестко связанной со звеном 2 (инструментом).

Известно, что скорость движения точки твердого тела, вращающейся вокруг неподвижной оси, равна векторному произведению угловой скорости на радиус-вектора точки. Тогда составляющие скоростей на координатной оси будут иметь следующий вид:

$$V_x = \begin{vmatrix} W_Y & W_Z \\ y & z \end{vmatrix} \quad V_Y = \begin{vmatrix} W_X & W_Z \\ z & x \end{vmatrix} \quad V_Z = \begin{vmatrix} W_X & W_Y \\ x & y \end{vmatrix} \quad (13)$$

Используя матричный метод преобразования координат, запишем выражение(3) скорости скольжения в следующем виде:

$$\begin{aligned} V_x^{(12)} &= -y(1 - U_{21} \cos \gamma_c) - ZU_{21} \sin \gamma_c \\ V_y^{(12)} &= x(1 - U_{21} \cos \gamma_c) - AU_{21} \cos \gamma_c \\ V_z^{(12)} &= (X + A)U_{21} \sin \gamma_c \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив выражения (12) и (14) в уравнение (7), после ряда математических преобразований, получим уравнение связи в следующем виде:

$$F(\lambda; \mu; \varphi_2) = \vec{N} \cdot \vec{V}^{(12)} = -\mu U_{21} R \sin \gamma \cos(\varphi_1 + \lambda) - AU_{21} R \cos \gamma \sin(\varphi_1 + \lambda) = 0 \quad (15)$$

Совокупность семейства поверхностей (3), уравнения сопряжения (3) (связи) представляет собой искомую производную поверхность в следующем аналитическом виде:

$$\begin{aligned} X_2 &= f(\lambda)(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + \\ &+ f(\lambda)(-\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \gamma \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) - \mu \sin \gamma \sin \varphi_2 + A_2 \cos \varphi_2 \\ Y_2 &= f(\lambda)(-\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma \sin \varphi_1 \cos \varphi_2) + \\ &+ f(\lambda)(-\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \gamma \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - \mu \sin \gamma \cos \varphi_2 - A \sin \varphi_2 \\ Z_2 &= f(\lambda) \sin \gamma \sin \varphi_1 + f(\lambda) \sin \gamma \cos \varphi_1 + \mu \cos \gamma \\ &+ \mu U_{21} R \sin \gamma \cos(\varphi_1 + \lambda) - AU_{21} R \cos \gamma \sin(\varphi_1 + \lambda) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Система уравнений (15),(16) представляет семейство производящих поверхностей. Все они тела вращения сложной образующей.

Выводы. Использование предложенной математической модели позволит влиять на процесс полирования заготовок симметричной формы. Это влияние может быть сведено к управлению процессом полировки с целью получения заданных значений шероховатости обрабатываемой поверхности.

Л и т е р а т у р а

1. Каплан Н.А. «Высшая математика», Москва 1969.-754с.
2. Литвин Ф.Л. «Теория зубчатых зацеплений», Москва 1968.-526с

R e f e r e n c e s

1. Kaplan N.A. «Vysshaja matematika», Moskva 1969.-754s.
2. Litvin F.L. «Teorija zubchatyh zaceplenij», Moskva 1968.-526s

Г.Л. Мелконов, Л.Д. Мелконов, В.А. Плахотник

Математична модель кінематичного руху виконавчих органів 4-х шпindelної шліфо-полірувальної машини

Запропоновано математичну модель, кінематичного руху виконавчих органів 4-х шпindelної шліфо-полірувальної машини, що здійснює зв'язок між рухом заготовлі й сипучим наповнювачем.

Ключові слова: математична модель, кінематичний зв'язок між заготовлею й сипучим наповнювачем.

G.L. Melkonov, L.D. Melkonov, V.A. Plakhotnik

A mathematical model of the kinematic motion of the executive bodies of 4-spindle grinding and polishing machines

A mathematical model of the kinematic motion of the executive bodies of 4-spindle grinding and polishing machines, communication between the workpiece and the movement of loose filler.

Key words: mathematical model, the kinematic relationship between the workpiece and the loose filler.

Мелконов Г.Л. – старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Мелконов Л.Д. – к.т.н., доцент Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Плахотник В.А. – к.т.н., доцент Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Гутько Ю.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленного и художественного литья Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ЗАДАЧА О ДВИЖЕНИИ ПОИСКОВОГО ДИСКА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Реализована задача о качении поискового диска массой m и радиуса r по шероховатой горизонтальной поверхности с целью проведения экологического мониторинга терминалов, портовых погрузочных площадок и т.п.

Ключевые слова: диск, углы Эйлера, кинетическая энергия, уравнения Лагранжа, устойчивость движения, управляемость движения.

Памяти Анны Васильевны посвящается

1. Введение

На данном этапе повсеместно создаются устройства и приборы для проведения мониторинга окружающей среды, производственных площадей и других объектов с целью обеспечения нормальных условий жизнедеятельности. В статье предложена и аналитически обоснована одна из возможных моделей поискового радиоуправляемого диска для мониторинга удаленных участков, вызывающих потенциальную опасность.

2. Постановка задачи

Качение радиоуправляемого диска осуществляется с помощью автономного пружинного или батарейного движителя, обеспечив ему постоянную угловую скорость $\omega = \dot{\varphi} = const$, приняв, таким образом, угол $\varphi = \varphi(t)$ за угол собственного вращения известным.

Прецессионную (при повороте вокруг оси CZ) и нутационную (при отклонении диска от вертикального положения) составляющие мгновенного поворота $\vec{\omega}$ обозначим соответственно через $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$ и $\dot{\theta} = \dot{\theta}(t)$,

тогда:

$$\vec{\omega} = \vec{\dot{\varphi}} + \vec{\dot{\psi}} + \vec{\dot{\theta}}. \quad (1)$$

Таким образом, текущее положение диска полностью определится его обобщенными координатами центра масс x_c, y_c, z_c и углами Эйлера [1].

Задача состоит в определении кинематических и динамических характеристик диска на мониторинговом участке производственных площадей.

Приведённый рисунок (рис. 1) не повторяет традиционную ориентацию углов φ, ψ, θ , а даёт лишь его фронтальную проекцию на неподвижную плоскость YZ при этом система x, y, z жёстко связана с диском и отражает его гироскопичность.

3. Реализация задачи

Количественные и качественные характеристики движения диска с целью обеспечения его управляемости и устойчивости определим с помощью уравнений Лагранжа второго рода [2], которые для определения углов Эйлера имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} = Q_{\psi}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} = Q_{\theta}. \end{cases} \quad (2)$$

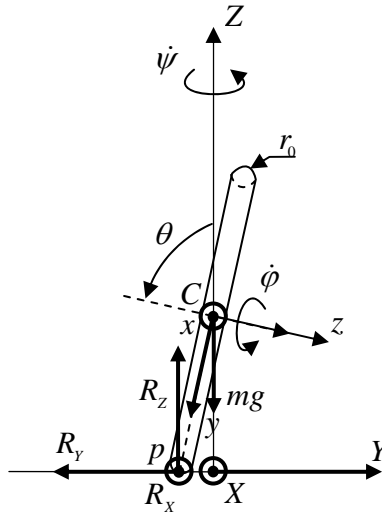


Рис.1. Вид в торец набегающего на нас диска. Составляющая реакции поверхности R_x направлена к нам Θ и находится с R_y в плоскости XY .

где

$$-T = \frac{1}{2} \left[m(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2) + I_z \omega_z^2 + I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 \right] \quad (3);$$

кинетическая энергия диска

– M_z – крутящий момент двигателя, обеспечивающего постоянную угловую скорость вокруг оси собственного вращения Cz

$$-I_z = 2I_x = 2I_y = \frac{mr^2}{2} \quad - \text{главные моменты инерции диска}$$

Поскольку $z = r \sin \theta$, а потенциальная энергия диска

$$\Pi = mgr \sin \theta \quad (4)$$

(g – ускорение свободного падения),

то обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате θ , определится формулой

$$Q_\theta = -\frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = -mgr \cos \theta. \quad (5)$$

Очевидно, что $Q_\varphi = M_z(t)$, а Q_ψ обращается в ноль. Далее, проецируя равенство (1) на координаты подвижной системы $Sxyz$, получим

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\psi} \sin \varphi \sin \theta + \dot{\theta} \cos \varphi, \\ \omega_y = \dot{\psi} \cos \varphi \sin \theta - \dot{\theta} \sin \varphi, \\ \omega_z = \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta. \end{cases} \quad (6)$$

Тогда с учётом того, что $\dot{\varphi} = \omega = const$ разрешающая система (2) примет вид:

$$\begin{cases} mr^2(\ddot{\psi} \cos \theta - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta) = 2M_z(t), \\ \ddot{\psi}(1 + \cos^2 \theta) - 2\omega \dot{\theta} \sin \theta - 2\dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta = 0, \\ r[\ddot{\theta}(1 + 4 \cos^2 \theta) - 4\dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta + \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta + 2\omega \dot{\psi} \sin \theta] = -4g \cos \theta. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, получены три уравнения с тремя неизвестными $\psi(t)$, $\theta(t)$ и $M_z(t)$. Проверочным условием является равенство крутящего момента M_z и момента реакции основания \bar{R} относительно оси Cz .

$$M_z = m_z(\vec{R}). \quad (8)$$

Для определения реакции шероховатой поверхности $\vec{R} = R_X \vec{i} + R_Y \vec{j} + R_Z \vec{k}$, а это необходимо и в задачах другой направленности, например, в проблеме износа контактирующих тел [3,4], необходимо предварительно воспользоваться кинематической связью.

Поскольку в случае чистого качения скорость точки контакта диска с основанием равна нулю, следует, что

$$\vec{V}_C = -\vec{\omega} \times \vec{CP}, \quad (9)$$

где проекции $\vec{\omega}$ в отличие от (6) на оси неподвижной системы координат XYZ представляются в виде

$$\begin{cases} \omega_X = \dot{\varphi} \sin \psi \sin \theta + \dot{\theta} \cos \psi \\ \omega_Y = \dot{\theta} \sin \psi - \dot{\varphi} \cos \psi \sin \theta \\ \omega_Z = \dot{\varphi} \cos \theta + \dot{\psi} \end{cases} \quad (10)$$

аналогично для \vec{CP} , имеем

$$\begin{cases} CP_X = r \sin \psi \cos \theta \\ CP_Y = -r \cos \psi \cos \theta \\ CP_Z = -r \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

Тогда из (9) следует, что

$$\vec{V}_c = r \left\{ \left[\dot{\theta} \sin \psi \sin \theta - \cos \psi (\dot{\psi} \cos \theta + \omega) \right] \vec{i} - \left[\dot{\theta} \cos \psi \sin \theta + \sin \psi (\dot{\psi} \cos \theta + \omega) \right] \vec{j} + (\dot{\theta} \cdot \cos \theta) \vec{k} \right\} \quad (12)$$

Дифференцируя это выражение по времени с учетом того, что $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные неподвижные орты, получим вектор ускорения центра масс диска

$$\vec{a}_c = \dot{\vec{V}}_c = \ddot{X} \vec{i} + \ddot{Y} \vec{j} + \ddot{Z} \vec{k}. \quad (13)$$

Теперь на основании теоремы о движении центра масс

$$m \vec{a}_c = m \vec{g} + \vec{R} \quad (14)$$

следует, что

$$\begin{cases} R_x = m \ddot{X} \\ R_y = m \ddot{Y} \\ R_z = m g + m \ddot{Z} \end{cases} \quad (15)$$

где

$$\begin{cases} \ddot{X} = r \left[\ddot{\theta} \sin \psi \sin \theta - \ddot{\psi} \cos \psi \cos \theta + \omega \dot{\psi} \sin \psi + \right. \\ \left. + (\dot{\psi}^2 + \dot{\theta}^2) \sin \psi \cos \theta + 2 \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \psi \sin \theta \right] \\ \ddot{Y} = -r \left[\ddot{\theta} \cos \psi \sin \theta + \ddot{\psi} \sin \psi \cos \theta + \omega \dot{\psi} \cos \psi + \right. \\ \left. + (\dot{\psi}^2 + \dot{\theta}^2) \cos \psi \cos \theta + 2 \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \psi \sin \theta \right] \\ \ddot{Z} = r (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) \end{cases} \quad (16)$$

Следует отметить, что при малых ψ и θ условие (8) можно заменить приближенной формулой

$$M_z \approx R_X \cdot r. \quad (17)$$

Очевидно, что составляющие реакции (15) при определенных условиях исключают проскальзывание диска при его движении по горизонтальной поверхности.

Так составляющие \bar{R}_X и \bar{R}_Y обеспечивают полный контакт в продольном (курсовом) и поперечном направлениях (боковой накат) и тем самым исключают скачкообразное изменение углов φ и θ . Составляющая \bar{R}_Z исключает явление скольжения при верчении вызываемым достаточно малым изменением угла ψ . Из физических соображений эти условия можно представить в виде:

$$R_X \leq \frac{\delta_1}{r} mg \sin \theta \quad (18)$$

$$R_Y \leq \frac{\delta_1}{r_0} mg \cos \theta \quad (19)$$

$$R_Z \leq J_y \ddot{\psi} \left(\frac{f}{\delta_2} \right) \sin \theta \quad (20)$$

где: δ_1 - коэффициент трения качения, f - коэффициент трения сцепления, а δ_2 - коэффициент трения верчения. Обычно δ_2 значительно меньше δ_1 .

При этом последнее условие отражает динамическую сущность общего случая качения диска по шероховатой поверхности ($\ddot{\psi}$ определяется решением системы(7)).

В конечном итоге следует отметить, что условия (18-20) сконструированные на основании эмпирических подходов в изучении явлений трения и возможного последующего скольжения, когда соответствующие неравенства переходят в противоположные, оказываются противоречивыми на переходных режимах движения. В случае последующего перехода чистого качения в режим скольжения происходят термодинамические изменения в области контакта и существенно активизируется адгезионный износ качественные и количественные оценки которого получены во второй главе [4].

Кроме того в цитируемой работе учтен фактор пластических процессов контактирующих большегрузных тел.

Численная реализация системы (7) проведена при $\varphi_0 = 0$; $\dot{\varphi}_0 = \omega_0 = 10c^{-1}$, $m = 10кг$, $r = 0.3м$, радиусе скругленности кромки диска $r_0 = 2 \cdot 10^{-3}м$, $\delta_1 = 10^{-3}м$, $f = 0.5$, $\delta_2 = 1.5 \cdot 10^{-4}м$, $\psi_0 = \frac{\pi}{60}$, $\dot{\psi}_0 = 0$, $\theta_0 = \frac{\pi}{30}$, $\dot{\theta}_0 = 0$.

Для рассматриваемой модели устойчивость её движения обеспечивается прежде всего её гироскопичностью, для которой $J_z > J_x, J_y$, а также начальными условиями и подтверждается решением системы (7) из которого следует, что $\omega = \dot{\varphi}_0 \gg |\dot{\theta}, \dot{\psi}|$ (для рассматриваемой задачи на порядок). При этом ω более чем в три раза превышает значение критической угловой скорости, которая соответствует потере устойчивости. Для рассматриваемой модели $\omega_{кр} \approx 2,9c^{-1}$. Очевидно, что $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ имеют осциллирующий характер изменения во времени с периодом T и, как следует из источника [5],

$$T = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{2}{3} r \left(\omega^2 r - \frac{1}{4} g \right)}} \quad (21)$$

Для рассматриваемой модели $T=0,4с$. Решение линеаризованной системы (7) дает приближенное значение $T \approx 0.6с$.

Закон движения центра масс вытекает из уравнений (11) путем присоединения к первому уравнению слагаемого $\dot{X}t$, а его траекторией будет кривая, напоминающая растянутую пружину сонаправленную оси X .

Отклонение от прямолинейности движения обеспечивается изменением угла θ на основании свойства гироскопичности.

Очевидно, что аналитическое решение системы(7) затруднительно. Численная реализация усложняется требованием стыковки решений, полученных на разнофазных участках изменения углов ψ и θ , особенно в составлении начальных условий.

Однако, как уже было отмечено выше, обоснованные допущения и линеаризация разрешающих уравнений позволили с достаточной в инженерной практике точностью получить количественные и качественные ответы на поставленные в задаче вопросы по управляемости и устойчивости движения диска.

4. Выводы

Предложенная математическая модель поискового с дистанционным управлением диска позволила получить его тактические характеристики движения с целью проведения мониторинга производственных площадей, представляющих экологическую опасность.

Л и т е р а т у р а

1. Старжинский В. М. Теоретическая механика. М.: «Наука». 1980. –464с.
2. Парс Л.А. Аналитическая динамика. М.: «Наука» 1971. – 636с.
3. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. Москва, Ростов-на-Дону. 2007. – 114с.
4. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом/Монография. К.: ВІПОЛ, 1993. – 448с.
5. Т. Леви-Чивита, У.Амальди. Курс теоретической механики. Том II часть 2. Изд-во иностр. литературы. 1951. – 555с.

References

1. Starzhinskij V. M. Teoreticheskaja mehanika. M.: «Nauka». 1980. –464s.
2. Pars L.A. Analiticheskaja dinamika. M.: «Nauka» 1971. – 636s.
3. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. Vvedenie v mehaniku kontaktnyh vzaimodejstvij. Moskva, Rostov-na-Donu. 2007. – 114s.
4. Golubenko A.L. Sceptlenie kolesa s rel'som/Monografija. K.: VIPOL, 1993. – 448s.
5. Халфман Р.Л. Динамика. – М.: «Наука», 1972. – 567 с.

Солодовник М.Д., Клипаков М.В.

Завдання про рух пошукового диска по горизонтальній поверхні

Реалізовано задачу про кочіння пошукового диску масою m і радіусу r по шорсткій горизонтальній поверхні з метою проведення екологічного моніторингу терміналів, портів вантажних майданчиків і т.п.

Ключові слова: *диск, кути Ейлера, кінетична енергія, рівняння Лагранжа, стійкість руху, керованість руху.*

Solodovnik M.D., Klipakov M.V.

The problem of motion search the disk on a horizontal surface

Implemented the task of rolling a search drive mass m and radius r on the rough horizontal surface to conduct environmental monitoring terminals, ports of new loading bays etc.

Keywords: *disk, the Euler angles, the kinetic energy, the Lagrange equations, the sustainability of the movement, control traffic.*

Солодовник М.Д. – к.ф.-м.н., доцент кафедри «Технологія машиностроєння і інженерного консалтинга» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск);

Клипаков Н.В. – старший преподаватель кафедри «Прикладная математика» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Витренко В.А., д.т.н., проф., заведуючий кафедрой «Технологія машиностроєння і інженерного консалтинга» Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля (г. Луганск).

ADVANTAGES OF NEURAL NETWORKS FOR DERIVING AN ELECTRONS SPECTRUM FROM DEPTH-CHARGE CURVE

Abstract. *The artificial intelligence methods considered for solving ill-posed inverse problem of reconstruction of the electrons spectrum from the distribution of the charge deposition. The comparative analysis performed for different neural networks types, method of least squares and method of Tikhonov regularization. The advantages and limitations of the radial basis function neural networks shown.*

Keywords: *inverse ill-posed problem, neural networks, spectroscopy, spectrum of electrons beam, depth-charge curve*

1. Introduction

1.1. Problem statement

Problem of deriving an energy distribution of electron beam by measurement the depth-charge curves can be described by Fredholm integral of the first kind:

$$f(x) = \int_{E_L}^{E_R} Q(x, E)y(E)dE . \quad (1)$$

The model of absorbers method is applied in order to simulate measuring of depth-charge curve. So in discrete case system of linear equation approximates the integral (1) [1]:

$$Ay = f , \quad (2)$$

where, elements of matrix A are determined by known Fredholm kernel $Q(x, E)$, sampling type of electrons spectrum $y(E)$ (the step ΔE should be chosen before start the problem solving) and samples features of discrete $f(x)$ (the step Δx is given in accordance with characteristics of meter).

1.2. Analysis of latest researches and publications

Generally the spectroscopy inverse problem is ill-posed (particularly the reconstruction of the electrons spectrum by measurement the depth-charge curve). So the inaccuracy of measuring and the need for equation (1) sampling suppose the deviations of elements of f , A and affect the quality of data evaluation. Thereupon the special class of data evaluation methods is used. One of them is method of Tikhonov regularization [2] which is based on involvement of apriory information about solution's smoothness and solution's nearness to some vector. But these methods do not use physical constraints, e.g., domains, correlations. Therefore, the results of these methods may have no physical meaning (method failure) [3].

1.3. Aim of the work

In this work, a method based on neural networks (NN) is proposed to solve equation (1). This proposition is based on two prerequisites. Firstly, the inverse problem (2) is defined as problem of multidimensional functions approximation [5]:

$$Err(\tilde{f}, Ay_{\bar{E}}) \rightarrow \min , \quad (3)$$

where Err – error function, \tilde{f} – measured depth-charge curve, $y_{\bar{E}}$ – output of function $y(E)$ with \bar{E} parameters. In accordance to [5] and [4] the approximation problems can be

solved by NN. Secondly, the existing computer models of the electrons beam, interaction of electron radiation with target, depth-charge curve are used to generate “input-output” pairs which are necessary for NN training procedure.

2. Research materials

Experimental determination of NN advantages for reconstruction electrons spectrum by measurement of depth-charge curve is performed according to the approach described in the paper [6]. The algorithm for comparing methods of data evaluation was developed (Fig. 1).

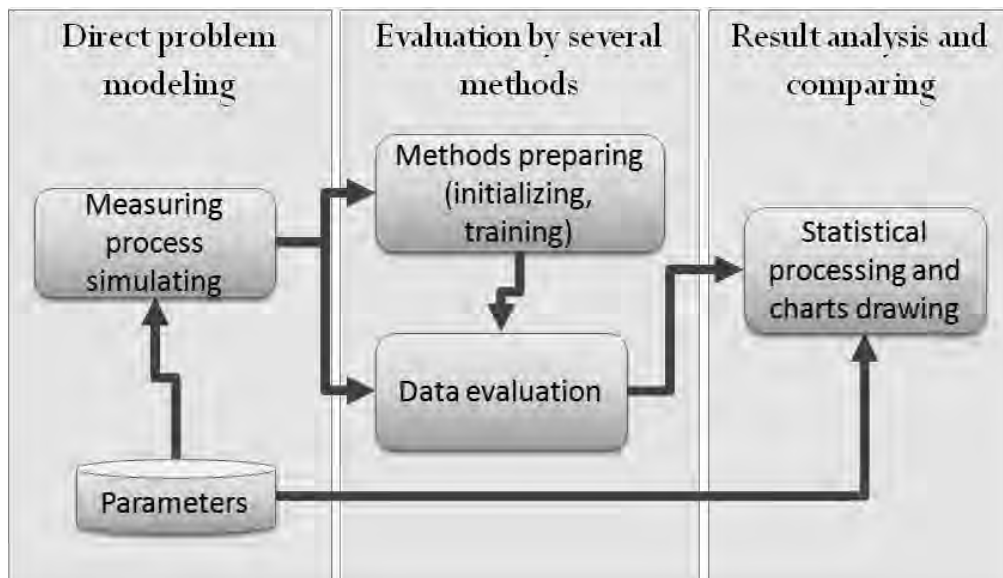


Fig. 1. Schema of the computational experiment.

As shown in Fig. 1 the algorithm consists of three steps:

1. Sampling of noisy data. There are implementation of several models of physical environments and processes, such as: spectrum of electron beams, interaction of electron radiation with target, depth-charge curve measurement with meter inaccuracy.
2. Applying NN and conventional methods for data evaluation. Radial-basis function networks (RBF-nets) are contrasted with methods of least squares (MLS) and Tikhonov regularization (MTR).
3. Statistical comparison of evaluation results. The deviation, variance, distortion of determined spectrum, probability of method failure are used as criteria of methods effectiveness.

The statistical comparison of methods supposes that evaluation of sample s_k errors (difference between method outputs and true values) are calculated and saved for each technique. After that the s_k is deleted and new independent s_{k+1} is sampled. Further set of samples s_k is denoted $T = \{s_k\}$. Note that special set of samples $L = \{s_l\} : L \cap T = \emptyset$ is generated for initializing and training methods based on NN.

The each iteration of experiment supposes fixed meter characteristics (absorbers and films material, absorbers width, measurement error and other) and fixed sets L and T .

2.1. Direct problem

The model of experimental data (ED) generation consists of two stages. These are true values getting and uncertainty adding which is caused by characteristics of measurement device and external influence on the desired signal.

Principle of depth-charge curve measurement by absorbers method is shown in fig. 2. Electrons beam irradiates the meter which is composed of several absorbers separated by films. Electrons interact with absorbers and stop at some depth. Each film determines number of electrons and films set provides insight into depth-charge curve.

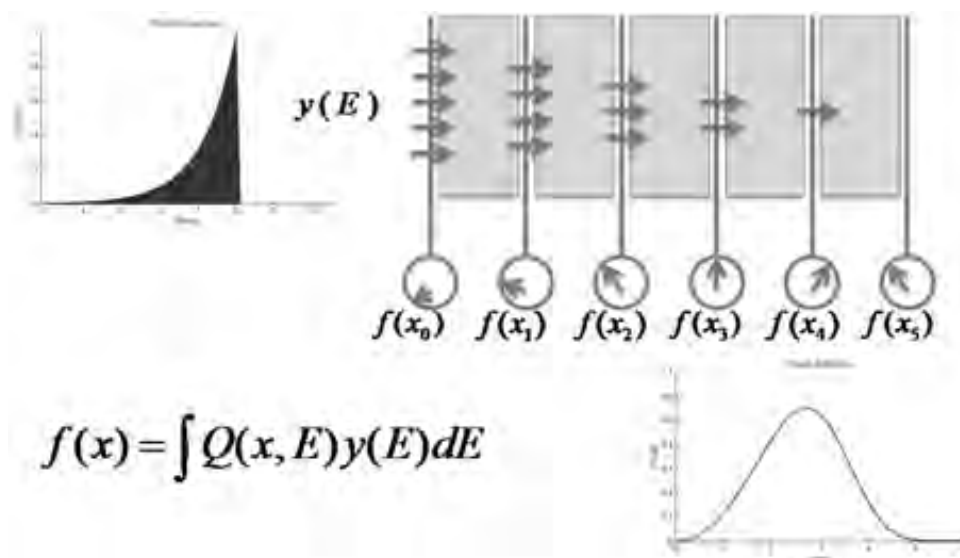


Fig. 2. Principle of absorbers method

The work [7] describes dependencies which define the kernel $Q(x, E)$ of integral (1) for depth-charge curve. The energy distribution of electrons beam $y(E)$ defined as:

$$y(E, \bar{E}) = \begin{cases} e^{\mu(E-E_{prob})}, & 0 < E \leq E_{prob} \\ k_1 E + k_2, & E_{prob} < E \leq E_{max} \\ 0, & E > E_{max} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\ln(0.1)}{E_{slope} - E_{prob}}, k_1 = \frac{1}{E_{prob} - E_{max}}, k_2 = \frac{E_{max}}{E_{max} - E_{prob}}$$

where E_{max} – the maximum energy of the electrons in the beam, E_{prob} – most probable energy of the electrons in the beam, E_{slope} – energy of electrons with intensity lower than intensity of E_{prob} -electrons in 10 times on left slope of the spectrum. Function (4) and parameters $\bar{E} = (E_{slope}, E_{prob}, E_{max})$ set the energy distribution of electrons beam explicitly. Obviously, the parameters depend on each other in accordance with constraint:

$$0 < E_{slope} < E_{prob} \leq E_{max}. \quad (5)$$

As mentioned previously, during measuring the depth-charge curve and solving inverse problem the dependencies $y(E)$ and $f(x)$ are sampled. In this case the Fredholm integral equation (1) is approximated by trapezoids and elements of matrix $A_{n \times m}$ for equation (2) are calculated as on:

$$a_{i,j} = pQ(x_i, E_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$p = \begin{cases} \Delta E / 2, & j = 1 \vee j = m \\ \Delta E & otherwise \end{cases}, \quad (7)$$

where n – number of points on spectrum of electrons beam, m – number of sensitive films in the meter.

The meter construction features and external factors influence determine deflections of the measured values of f_k , so the ED are not equal to their true values. In the work normally distributed relative error of measuring is used:

$$\tilde{f}_k = f_k + f_k d \cos(2\pi r_1) \sqrt{-2 \ln(r_2)}, \quad (8)$$

where d – relative error of measuring, r_1, r_2 – independent uniformly distributed in $[0,1]$ random numbers.

The outputs of implementation of model described is a vector s_k that contains vector \tilde{f}_k and parameters $E_{slope}, E_{prob}, E_{max}$ which are uses to calculate evaluation methods errors:

$$s_k = (\tilde{f}, \bar{E})_k = (f_1, f_2, \dots, f_m, E_{slope}, E_{prob}, E_{max})_k. \quad (9)$$

2.2. Data for methods initialization and training

Five spectra (Fig. 3) which are scaled to $[0,1]$ along intensity axis and have equal spread are used to sample vectors s_k or s_l for the corresponding sets T or L . The spectra 2 and 4 are applied to evaluation methods testing and 1, 3 and 5 (hereinafter referred to as calibration spectra) are applied to methods preparation. It means that half part of set T contains the s_k based on spectrum 2 and other part contains the s_k based on spectrum 4. The set L are generated similarly. It should be noted that set L can be divided into set for training and set for validation in accordance to needs of used training algorithm.

As shown in Fig. 3 the calibration spectra cover the range of values of testing spectra parameters $E_{slope}, E_{prob}, E_{max}$ and determine base points which are necessary for approximation.

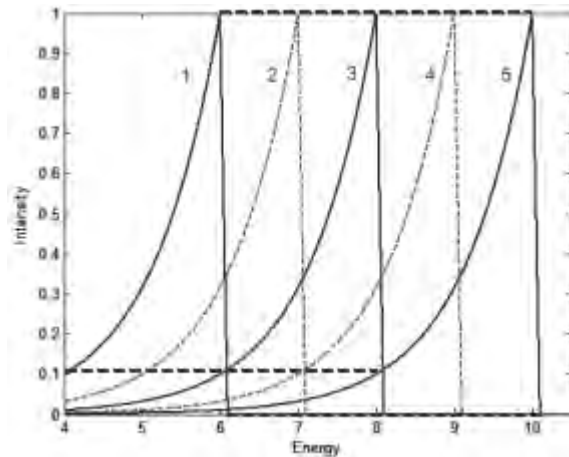


Fig. 3. Spectra for methods preparation (1, 3, 5) and testing (2, 4)

The following assumptions are applied when selecting the spectra i.e. selecting \bar{E} :

1. uncertainty δ^* of true energy distribution of electrons beam is much less than uncertainty of measuring procedure;
2. differences between the selected true spectra much more than uncertainty δ^* .

All the s_k and s_l meant for NN are scaled before processing according to mapping $\left[0, \max_L E_{\max}\right] \rightarrow [0,1]$ and are scaled back appropriately afterwards.

2.3. Inverse problem

In the work the equation (2) is solved by all methods consistently. Each method is applied for the same sample s_k and calculates values of parameters $\bar{E} = (E_{slope}, E_{prob}, E_{\max})$. Following is a brief definition of methods used.

The **RBF-nets** consists of three layers: input, hidden and output. The nodes within each layer are fully connected to the next layer. Hidden layer is formed by neurons with radial basis activation function and performs nonlinear mapping of the input space into a hidden space with greater dimension. This increases the probability of correct patterns separability [8]. The output layer approximates the hyperplane in the hidden layer.

In the work three types of RBF-nets are used: RBF-net (RBF), RBF-net with zero error on the training vectors (RBFZ), General regression neural networks (GRNN).

The RBF and RBFZ topology are the same and difference between these networks is in learning algorithm. Initially the first layer of RBF has no neurons. The neurons with radial basis function are added during the learning until the network's mean squared error falls below defined goal. The number, weights and biases of the RBFZ's neurons sets in accordance to size and values of training set.

The conventional methods MLS and MTR are used to reveal advantages of NN.

The **MLS** calculates the parameters \bar{E} as on:

$$\bar{E} = \arg \min_{\bar{E}} \|Ay_{\bar{E}} - \tilde{f}\|, \quad (10)$$

where $\|\cdot\|$ – Euclidean norm.

The **MTR** minimizes solution residual and smoothness as on:

$$\bar{E} = \arg \min_{\bar{E}} \left(\|Ay_{\bar{E}} - \tilde{f}\|^2 + \alpha \|y_{\bar{E}}\|^2 \right), \quad (11)$$

where $\alpha > 0$ regularization parameter. In the work the parameter α is selected in accordance to equation [1]:

$$\frac{\|y^\alpha - y\|}{\|y\|} \rightarrow \min, \quad (12)$$

where y true solution, i.e. initial spectrum which was used while sampling vector \tilde{f} . Golden section search [9] is used to find minimum of the function (11).

2.4. Methods comparison criteria

The collection of statistical characteristics used to compare methods. These characteristics are average and variance of several metrics that in various ways describe the mismatch between true and reconstructed spectra. The three groups of metrics are in the work. They are mismatch along energy axis E , mismatch along intensity axis y , common characteristics.

Mismatch along energy axis (Fig. 4). Squared difference between estimated values of parameters \tilde{E}_{slope} , \tilde{E}_{prob} , \tilde{E}_{max} and their true values E_{slope} , E_{prob} , E_{max} are calculated for s_k . So the displacements of the appropriate points of spectrum along energy axis are determined. The obtained distances for all $s_k \in T$ are used to compute average and variance of each parameter.

Mismatch along intensity axis (Fig. 5). Assume that y_k and \tilde{y}_k are sets of n values of function (4) based on true and evaluated spectrum parameters \bar{E} in points E_0, E_1, \dots, E_n for s_k .

1. average $M(r)$ and standard deviation σ_r of distance along intensity axis between reconstructed and true spectra are based on metric:

$$r_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{k_i} - \tilde{y}_{k_i})^2; \quad (13)$$

2. average $M(r^{Cheb})$ and standard deviation $\sigma_{r^{Cheb}}$ of maximum distance along intensity axis between reconstructed and true spectra are based on Tchebyshev metric:

$$r_k^{Cheb} = \sup |y_{k_i} - \tilde{y}_{k_i}|. \quad (14)$$

Common characteristics of evaluation (Fig. 6).

1. average $M(r^{Sq})$ and standard deviation $\sigma_{r^{Sq}}$ of integral between reconstructed and true spectra, i.e. of extent of spectrum distortion, based on metric:

$$r_k^{Sq} = \left| \int_{E_L}^{E_R} y(E, \tilde{E}_{slope}, \tilde{E}_{prob}, \tilde{E}_{max}) dE - \int_{E_L}^{E_R} y(E, E_{slope}, E_{prob}, E_{max}) dE \right|, \quad (15)$$

where \tilde{E}_{slope} , \tilde{E}_{prob} , \tilde{E}_{max} evaluated parameters, a E_{slope} , E_{prob} , E_{max} – theirs true values.

2. the probability of method failure are determined with number of equation (1) solutions which are breach the constraint (5).

3. Results and discussions

The model of direct problem, methods of measuring results processing and comparing algorithms are implemented in MATLAB. In order to solve equations (10) and (11) numerically the function *fminsearch()* is used. It should be noted that initial values of \bar{E} for both MLS and MTR are $E_{slope} = 7$, $E_{prob} = 8$, $E_{max} = 9$. So the code listing for MLS is:

```
eMLS = fminsearch(@(en) power(norm(A*y(eSet, en)' - b), 2), [7 8 9]);
and for MTR is:
```

```
eMTR = fminsearch(@(en) (power(norm(A*y(eSet, en)' - b), 2) ...
+ lambda*power(norm(y(eSet, energy)'), 2)), [7 8 9]);
```

The functions *newrb*, *newrbe* and *newgrnn* are used to implement measured data processing by RBF, RBE and GRNN respectively. Parameter *spread* (width of radial basis function) equals 0.6 for all networks under investigation.

Other parameters of computer experiment are shown in the Tab. 1.

Parameters of computational experiment

Spectra (training)	E_{slope}	E_{prob}	E_{max}	Measured curve	depth-charge
	1) 4	6	6.2		
	3) 6	8	8.2		
Spectra (testing)	E_{slope}	E_{prob}	E_{max}	Noise (d)	0..15% with 1% step
	2) 5	7	7.2		
	4) 7	9	9.2		
Sampling by E	$E \in [3;10.2], \Delta E = 0.1$			Sampling by x	$x \in [0;6], \Delta x = 1$
Training set cardinality	3×1000			Absorber material	Al ($A = 27, Z = 13$)
Testing set cardinality	2×1000			Absorber count	7

The Fig. 4, 5, 6 present the charts with dependencies between statistical characteristics of ED processing and measurement error d . The Fig. 7 shows the spectra which were reconstructed by MLS, MTR and GRNN from depth-charge curve with $d = 0.05$.

In accordance to appropriate plots shown in Fig. 4, 5, 6 the RBF and RBFN networks can solve inverse problem and can compete with conventional methods, but results obtained with these networks have larger variance than variance of results obtained by MRT. So the further discussion concentrates on advantages of GRNN networks.

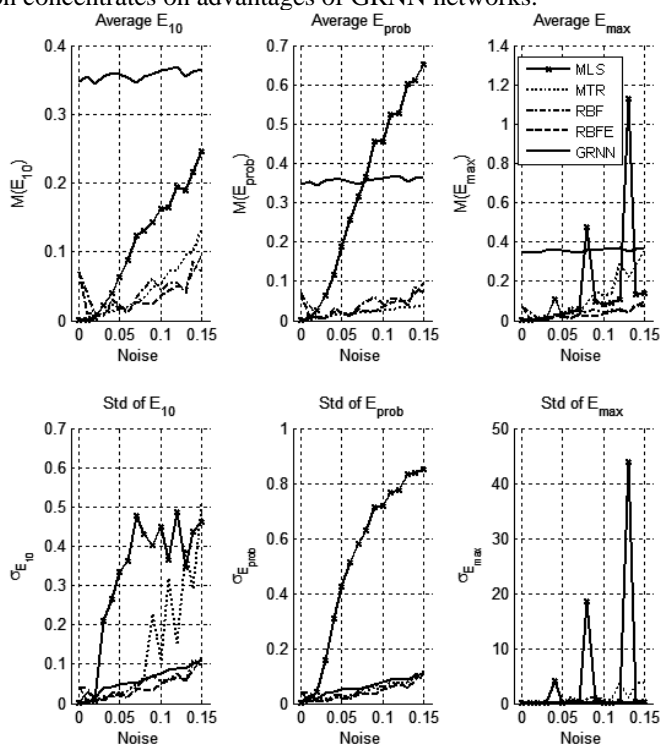


Fig. 4. Statistical comparison of methods for measuring results processing (axis E)

The charts “Average distance” and “Std of distance” in Fig. 5 shows the GRNN advantages which are revealed in small outputs variance, but the results obtained by this NN have systematic error – shift of the reconstructed spectra. As shown in Fig. 7 the restored spectra

tend to spectrum 3 (Fig. 3) along energy axes. Appropriate shifts of parameters E_{slope} , E_{prob} , E_{max} can be observed in Fig. 4. The reason of little varied Tchebyshev criteria for GRNN (“Average max distance” and “Std of max distance” in Fig. 5) is a shift of results too. The point of maximum distance between reconstructed and true spectra is always in the point where $E = \tilde{E}_{prob}$, $E = 0$, or $E = 0$, $E = E_{prob}$.

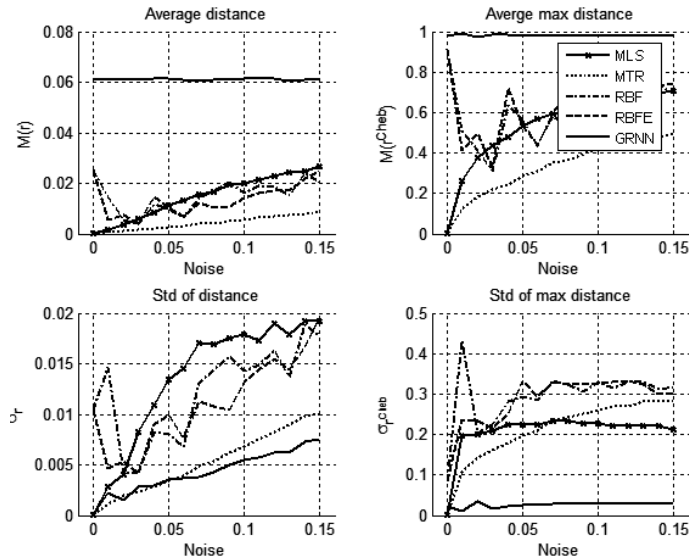


Fig. 5. Statistical comparison of methods for measuring results processing (axis y)

Note that the error of GRNN does not correlate with measurement error. So it is most possible that the value of this error depends on value of selected spread of the NN activation functions and number and placement of calibration spectra.

In accordance to chart “Failures” in Fig. 6 all solutions obtained by NN meet the physical requirements (5), i.e. the probability of method failure equals 0%. Along with this comparison of plots in Fig. 6 and 7 show that MLS tends to incorrect determination of parameter E_{prob} and MTR makes mistakes in determination of parameter E_{max} .

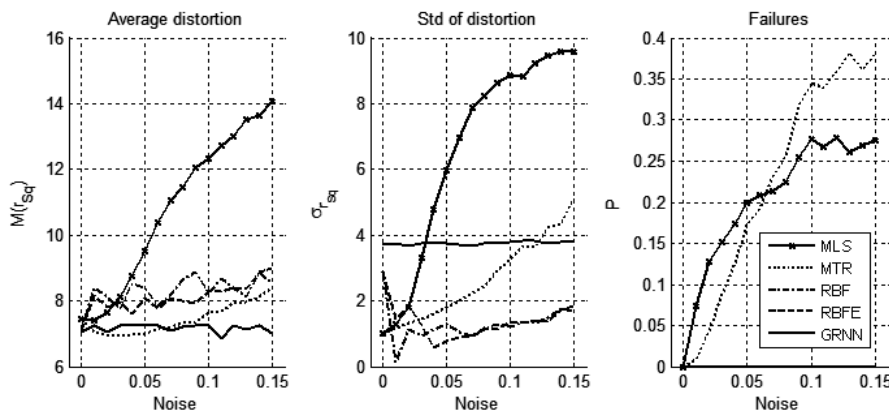


Fig. 6. Statistical comparison of methods for measuring results processing (common characteristics)

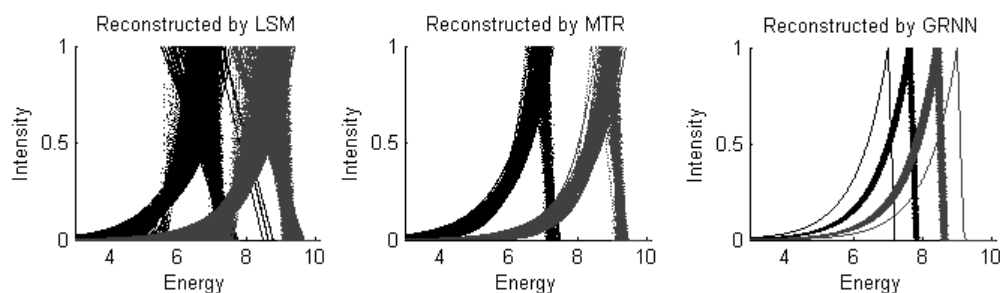


Fig. 7. Spectra which were reconstructed by MLS, MTR and GRNN from depth-charge curve with measuring error $d = 0.05$

4. Conclusions

The advantages of several methods of processing ED were determined based on computer statistical experiment of recovering spectrum of electrons beam by depth-charge curve. In the work are shown that the special type of RBF-net can reconstruct spectra with low variance and without violations of physical conditions. But in contrast to conventional methods the investigated NN gives a systematic error which depends on parameters of training procedure and network topology.

Further investigations will be connected with declining of networks error influence, i.e. determining the type and the character of dependent network parameters. Optimization of the meter material and construction for the purpose to obtain maximum information about electrons beam is a second direction of planned research.

References

1. Petrov Yu.P., Sizikov V.S.: Well-Posed, Ill-Posed, and Intermediate Problems with Applications. VSP, Leiden-Boston (2005)
2. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y.: Solutions of Ill-Posed Problems Wiley, New York (1977)
3. Baiev O. U., Lazurik V. T.: Regularization of the procedure of photon's energy determination using artificial intelligence methods. Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University Series "Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems" vol 13(890) (2010) 5-11 [in Russian]
4. Haykin S. Simon: Neural networks and learning machines. Prentice Hall, New Jersey (2009)
5. Michael M. Li, William Guo, Brijesh Verma, Kevin Tickle, John O'Connor: Intelligent methods for solving inverse problems of backscattering spectra with noise: a comparison between neural networks and simulated annealing. Neural Comput. & Applic. 18 (2009) 423-430
6. Baiev O.U., Lazurik V.T., Pochynok A.V: Statistical approach to comparing the numerical methods for the empirical data processing. Bulletin Kherson National Technical University vol. 3(39) (2010) 53-57 [in Russian]
7. Valentina Lazurik, Tatsuo Tabata, Valentin Lazurik: A database for electron-material interactions. Radiation Physics and Chemistry vol. 60 issue 3 (2001) 161
8. Cover T.M.: Geometrical and statistical properties of systems of linear inequalities with applications in pattern recognition. IEEE Transactions on Electronic Computers vol. EC-14 (1965) 326-334
9. Antia H.M.: Numerical methods for scientists and engineers, Second edition. Birkhäuser, Basel (2002)

В работе рассматриваются методы искусственного интеллекта для решения обратной некорректной задачи восстановления спектра пучка электронов по измеренному глубинному распределению заряда. Выполнен сопоставительный анализ для методов наименьших квадратов, регуляризации Тихонова и нескольких видов нейронных сетей. Показаны преимущества и недостатки нейронных сетей на радиально-базисных функциях.

Ключевые слова: обратные некорректные задачи, нейронные сети, спектроскопия, спектр пучка электронов, глубинное распределение заряда

В роботі розглядаються методи штучного інтелекту для розв'язання оберненої некоректної задачі відновлення спектру електронів за вимірним розподіленням поглиненого мішенню заряду. Порівняння можливостей виконано для методів найменших квадратів, регуляризації Тіхоннова та декількох видів нейронних мереж. Знайдено переваги та недоліки нейронних мереж що базуються на радіально-базисних функціях.

Ключові слова: обернені некоректні задачі, нейронні мережі, спектроскопія, спектр пучка електронів, глибинне розподілення заряду

Baiev Oleksandr – postgraduate student of School of Computer Sciences V.N. Karazin Kharkiv National University

Lazurik Valentine – Doctor of Physics and Mathematics, Dean of School of Computer Sciences V.N. Karazin Kharkiv National University, Chief of the Chair "Simulation of Systems and Technologies"

Reviewer: Dolya Grigory, doctor of technical sciences, professor, member of the International Academy of Applied Electronics.

УДК 621.783.2-027.236

Ю.Г. Качан, В.В. Степкин, Ю.Б. Спекторова

г. Запорожье

О ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ПЕЧЕЙ

В статье рассмотрены основные проблемы нагревательных газовых печей. Определены направления дальнейших исследований. Ист. б.

Ключевые слова: нагревательная печь, тепловой поток, температурное поле, энергоэффективность, энергетические потери.

Введение. На сегодняшний день в промышленности нашей страны широко используются нагревательные печи, работающие на природном газе. Это самый распространенный класс указанных технологических агрегатов, поскольку применяются они в черной и цветной металлургии, в машиностроении и т.д. Но большая часть таких печей устарела и нуждается в реконструкции.

Как известно, нагревательные печи – это промышленные установки для нагрева слитков и заготовок перед обработкой давлением (прокатка, ковка, штамповка и т.д.). Они могут быть периодического (нагревательные колодцы, камерные печи) и непрерывного (методические, кольцевые, карусельные и конвейерные печи) действия [1-4].

Современные нагревательные печи представляют собой разнообразные по конструкции, сложные тепловые агрегаты, которые содержат к тому же много вспомогательного оборудования. Сами печи включают в себя рабочее пространство и устройства для генерации теплоты (горелки). В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации теплоты и очистки уходящих дымовых газов, вентиляторы, дымоходы, дымовые трубы, контрольно-измерительные приборы и системы управления печью.

Постановка проблемы. В нагревательных печах существует ряд проблем, многие из которых обусловлены недостатками конструкций (например, аэродинамикой), что, как следствие, приводит к нежелательному движению потоков теплоты и несовершенству технологии нагрева металла. Все это усугубляется тем, что печи являются крупными потребителями газообразного топлива. Причем на прямой нагрев металла используется его примерно 40-45%, остальное составляют потери. Учитывая стремительный рост цен на газ, становится очевидной необходимость разработки инновационных подходов, направленных на повышение энергоэффективности рассматриваемых технологических объектов.

Проблема снижения энергетических потерь в металлургии всегда была достаточно актуальной. Как известно, сэкономленная у потребителя 1 т.у.т. эквивалентна 2,5 т.у.т. вновь добываемых топливных ресурсов [5]. Помимо этого энергосбережение является важной частью охраны окружающей среды, ведь благодаря снижению расхода топлива уменьшается количество вредных выбросов в атмосферу. Поэтому использование энергосберегающих технологий является наиболее перспективным направлением для металлургических предприятий Украины, а разработка и внедрение энергосберегающих мероприятий для нагревательных печей с целью снижения расхода топлива становится приоритетной.

Сказанное подтверждается довольно жесткими требованиями, предъявляемыми сегодня к работе нагревательных газовых печей, основные из которых следующие [4, 6]:

- обеспечение равномерности нагрева заготовки, удовлетворение требований относительно степени обезуглероживания, окалинообразования и перегрева, снижение термических напряжений и т.д.;
- обеспечение заданного уровня производительности;
- эффективное, рациональное использование энергетических ресурсов и улучшение показателей использования топлива.

Для обеспечения выполнения этих требований необходимо:

- иметь возможность оценивать тепловую нагрузку печи по различным зонам;
- иметь четкое представление о распределении температурного поля внутри камеры;
- обладать сведениями об изменении теплового потока не только по объему печи, но и во времени с учетом параметров камеры, источников горения, тяги и т.д.

Эти сведения позволят определить т.н. «мертвые зоны» камеры, зоны с меньшей плотностью тепловой энергии и меньшей температурой, что даст возможность располагать детали в более выгодных местах. Кроме того влиять на процесс движения тепловых потоков можно также аэродинамикой печи, направляя тепловые потоки непосредственно к месту расположения заготовки.

Очевидно, что для правильного проектирования новых и реконструкции действующих печей, для определения наиболее выгодного и эффективного режима работы становится необходимым проведение многочисленных экспериментальных исследований на реальных объектах. Но проведение подобных экспериментов по изучению теплообменных процессов на действующих установках является довольно сложным и дорогостоящим. Более того, эксперименты по определению температуры факела и кладки, динамики изменения температуры теплового потока в различных точках по объему печи и ряд других не целесообразно осуществлять на реальных установках из-за их трудоемкости, что делает невозможным изучение многочисленных вариантов изменения параметров печей.

Выводы. Таким образом, для решения задач энергоэффективности нагревательных газовых печей сейчас, прежде всего, нужно иметь их адекватные математические модели, содержащиеся в явном виде, как энергетические характеристики, так и конструктивные параметры этих объектов, и позволяющие прогнозировать динамику изменения температурного режима в рабочем пространстве печи.

Литература

1. Матрюков Б.С. Расчеты металлургических печей / Матрюков Б. С. – М.: Металлургия, 1986. – 376с.
2. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154с.
3. Теплотехника металлургического производства. Т.2. Конструкция и работа печей: Учебное пособие для вузов/ Кривандин В.А. и др. – М.: «МИСИС», 2001. – 736с.
4. Аверин С. И. Расчеты нагревательных печей. / [Аверин С. И., Гольдфарб Э. М., Кравцов А. Ф., Радченко И. И., Розенгарт Ю. И., Свинолобов Н. П., Семикин И. Д., Тайц Н. Ю.]. – М.: «Техника», 1969. – 540с.

5. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. – Л.: Недра, 1987. – 336с.
6. Губинский В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М.: Машиностроение, 1995. – 256с.

References

1. Mastrjukov B.S. Raschet metallurgicheskikh pechey / Mastrjukov B.S. – М.: Metallurgiya, 1986. – 376s.
2. Svinolobov N.P., Brovkin V.L. Pechi chernoy metallurgii: Uchebnoe posobie dlya vuzov. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2004. – 154s.
3. Teplotehnika metallurgicheskogo proizvodstva. T.2. Konstruktsiya i rabota pechey: Uchebnoe posobie dlya vuzov/ Krivandin V.A. i dr. – М.: «MISIS», 2001. – 736s.
4. Averin S.I. Raschet nagrevatelnih pechey / [Averin S.I., Goldfarb E.M., Kravtsov A.F., Radchenko I.I., Rozengart Y.I., Svinolobov N.P., Semikin I.D., Tayts N.J.]. – М.: «Техника», 1969. – 540s.
5. Isserlin A.S. Osnovi szjiganya gazovogo topliva. – Л.: Nedra, 1987. – 336s.
6. Gubiskiy V.I. Teoriya plamennih pechey / V.I. Gubiskiy, Lu Chzjun-U. – М.: Mashinostroyeniye, 1995. – 256s.

В статье рассмотрены основные проблемы нагревательных газовых печей. Определены направления дальнейших исследований. Ист. б.

Ключевые слова: *нагревательная печь, тепловой поток, температурное поле, энергоэффективность, энергетические потери.*

The article touches upon the main problems of the heating gas furnaces. Pointed to the directions the further investigations. Ref. 6.

Keywords: *heating furnace, thermal stream, temperature field, energy efficient, loss of power.*

Качан Ю.Г. – д.т.н., проф., заведующий кафедрой электротехники и энергетического менеджмента Запорожской государственной инженерной академии (г. Запорожье);

Степкин В.В. – к.т.н., доц. кафедры электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск);

Спекторова Ю.Б. – аспирантка кафедры электротехники и энергетического менеджмента Запорожской государственной инженерной академии (г. Запорожье).

Рецензент: *Губинский М.В.*, д.т.н., заведующий кафедрой теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск).

Д.С. Клочан, А.В. Калужный, П.Ю. Войлов

г. Луганск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СВЕТОСОБИРАНИЯ В ПЛОСКИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С МАЛЫМ ОТНОШЕНИЕМ ПЛОЩАДИ ВХОДНОГО ОКНА ФОТОПРИЕМНИКА К ВЫХОДНОМУ ОКНУ ДЕТЕКТОРА

Выполнено моделирование процессов светособирания для различных геометрических и оптических параметров сборки «кристалл-ФЭУ». Установлены некоторые закономерности светособирания в плоских цилиндрических кристаллах.

Ключевые слова: *сцинтилляционный кристалл, коэффициент светособирания, ФЭУ, моделирование.*

Введение

При проектировании приборов радиационного контроля требования к их тактико-техническим характеристикам зачастую диктуют необходимость максимально развить детектирующую поверхность сцинтилляционного детектора. При этом применить фотоприемник соответствующей площади или световод по ряду причин не представляется возможным.

В частности подобная проблема возникает при оптимизации геометрических размеров сцинтилляционного кристалла, предназначенного для детектора скрытых пустот [1]. Принцип работы подобных приборов основывается на зондировании объекта исследования коллимированным пучком гамма квантов и регистрации обратно рассеянного гамма излучения сцинтилляционным детектором, расположенным рядом с источником ионизирующего излучения. Полный зарегистрированный поток событий состоит из естественного фона, гамма квантов, рассеянных в элементах конструкции прибора и собственно информативных гамма квантов, рассеянных от объекта исследования. Учитывая тот факт, что детектор работает в счетном режиме, задачей оптимизации является обеспечение максимально возможного в данной геометрии измерения количества зарегистрированных информативных гамма квантов, что достигается максимальным развитием площади детектора.

Для проектирования таких детекторов и адекватной оценки, получаемых с них данных необходимо знать их амплитудно-пространственную характеристику (АПХ) – то есть отклик детектора как функцию от координаты взаимодействия гамма кванта с кристаллом.

Целью данной работы является исследование особенностей светособирания в плоских сцинтилляционных кристаллах с малыми соотношениями толщины детектора к его диаметру и площади входного окна фотоприемника к площади выходного окна детектора

Описание модели

С целью выбора адекватного инструмента и для дополнительной проверки результатов, моделирование светособирания в сцинтилляционном блоке предполагалось проводить как в среде GEANT4 (институт CERN, Швейцария) [3], так и в специализированном приложении для моделирования светособирания DETECT2000 (институт Laval, Канада) [2].

Конструктивно моделируемый сцинтилляционный блок включал в себя кристалл, засыпку и фотокатод. В модели учитывались процессы отражения оптических фотонов от засыпки, поглощение в засыпке и кристалле путем задания оптических свойств материалов и поверхностей раздела сред. Отражающая поверхность засыпки в модели полагалась матовой (фотон либо отражается под случайным углом внутрь объема, либо поглощается).

Выходными данными модели являлось количество фотонов, попавших на фотокатод от точечной центрально симметричной сцинтилляционной вспышки с заданными координатами, спектральным составом и интенсивностью. Интенсивность (количество фотонов) сцинтилляционной вспышки выбиралась произвольно из соображений обеспечения статистической достоверности коэффициента светособирания, который определяется как отношение энергии света, вышедшего из детектора через выходное окно ($E_{\text{выход}}$), к энергии фотонов E_{ϕ} , произведенных в акте радиолуминесценции [4]:

$$\tau = \frac{E_{\text{выход}}}{E_{\phi}}. \quad (1)$$

Для моноэнергетических фотонов из (1) заключаем, что коэффициент светособирания определяется как отношение количества фотонов, достигших фотокатода, к количеству фотонов в вспышке. В результате проведения модельных экспериментов в различных точках сцинтиллятора может быть получено поле светособирания $\tau(x, y, z)$.

Следует отметить, что описание геометрии модели в DETECT2000, в сравнении с GEANT4, весьма затруднительно. Объемы (компоненты) здесь задаются путем пересечения базовых поверхностей, которые могут быть общими с другими компонентами. Однако, одна поверхность разделяет только два компонента и попытка соединить три компонента по одной поверхности приводит к ошибке (такое соединение требуется в нашем случае для контакта ФЭУ с малым радиусом выходного окна с кристаллом большего радиуса, так как, помимо контакта с выходным окном, нижняя плоскость кристалла граничит и с засыпкой). Избежать подобного соединения возможно путем увеличения числа компонентов таким образом, чтобы каждая поверхность разделяла только два из них. В нашем случае кристалл был разбит на два компонента: цилиндр, граничащий с ФЭУ, радиусом равным радиусу входного окна ФЭУ и остальную часть, которая находится за ФЭУ и соприкасается с засыпкой. Очевидно, что в случае даже незначительного усложнения геометрии модели (например, добавление еще нескольких ФЭУ, световода) количество компонентов и сложность их описания значительно возрастет. Вместе с тем возрастет и вероятность ошибки, которую трудно обнаружить ввиду отсутствия каких-либо средств визуализации. И хотя в пакет DETECT2000, для упрощения описания геометрии входит программа BUILDER, применить ее в работе нам не удалось ввиду отсутствия какой-либо документации.

С другой стороны, базовыми элементами в GEANT4 являются не поверхности, а объемы. Свойства поверхностей естественно задаются как свойства границ раздела объемов. Есть возможность визуализации. Можно не только посмотреть геометрию модели в любом положении, но и проследить траектории движения частиц. Немаловажно и то, что пакет GEANT4 хорошо документирован.

Результаты моделирования, полученные нами с помощью DETECT2000, также не в лучшую сторону отличались от результатов полученных в GEANT4. В частности, отмечался неестественный рост коэффициента светособирания в непосредственной близости к цилиндрической границе кристалла. В итоге был сделан окончательный выбор в пользу GEANT4.

Результаты

Проверка адекватности модели проводилась путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на партии из 14 детекторов на базе кристалла CsI (Tl) диаметром 40 мм и толщиной 5 мм в сборке с ФЭУ с диаметром входного окна 11 мм [1].

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Кристалл детектора накрывался круглым свинцовым коллиматором толщиной 20 мм, в котором на заданных расстояниях от центра пластины (5, 10, 15, 19 мм) был выполнен ряд отверстий.

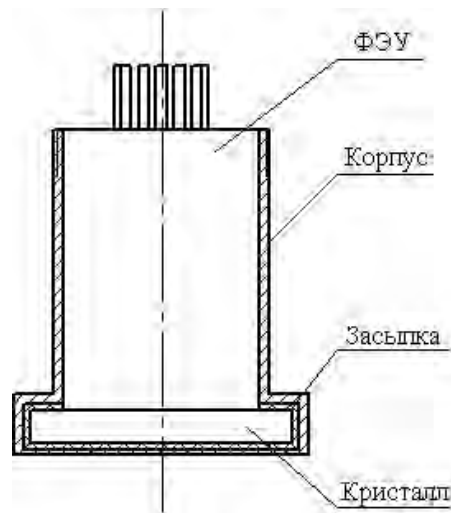


Рис. 1. Детектор CsI(Tl) и ФЭУ

В качестве источника ионизирующего излучения использовался изотоп ^{133}Ba , который последовательно устанавливался сверху на пластину коаксиально с каждым отверстием коллиматора, после чего в течении 300 секунд снимался спектр. Соответствующие измерения проводились в двух взаимно пересекающихся плоскостях в 13 точках детектора. Параметром, проверяемым при проверке, являлась амплитудно-пространственная характеристика кристалла (АПХ), которая является функцией положения на энергетической шкале пика полного поглощения (ППП) линии 356 КэВ от места регистрации в относительных единицах относительно центра кристалла.

Результат оценивался по минимальной относительной энергии ППП в точке 19 мм от центра кристалла по отношению к энергии ППП в центре кристалла E и асимметрии G [5].

На первом этапе программно-имитационных исследований с целью обеспечить максимальное соответствие результатов моделирования экспериментальным данным проводился подбор тех параметров модели, которые меняются в широких пределах от кристалла к кристаллу и значительно влияют на светособирание. Главным образом это касается длины свободного пробега и коэффициента отражения от поверхности кристалла. С этой целью была проведена серия модельных экспериментов, перекрывающих диапазон возможных изменений длины пробега фотона в кристалле CsI(Tl) - от 50 до 400 мм совместно с изменением коэффициента отражения от 0.8 до 0.99. Длина волны полагалась равной 560 нм, что соответствует максимуму высвечивания кристалла CsI(Tl). Весь спектр высвечивания не рассматривался, поскольку значения коэффициентов отражения и преломления, а также длина свободного пробега в широком диапазоне длин волн изменяются незначительно.

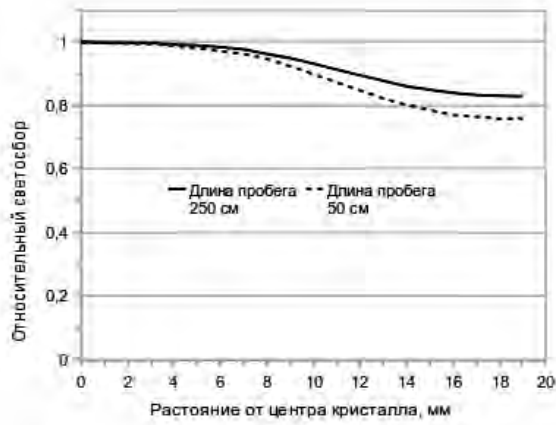
Оценивалась функциональная зависимость коэффициента светособирания от радиальной координаты акта радиолуминесценции.

Результаты численных экспериментов приведены на рис 2.

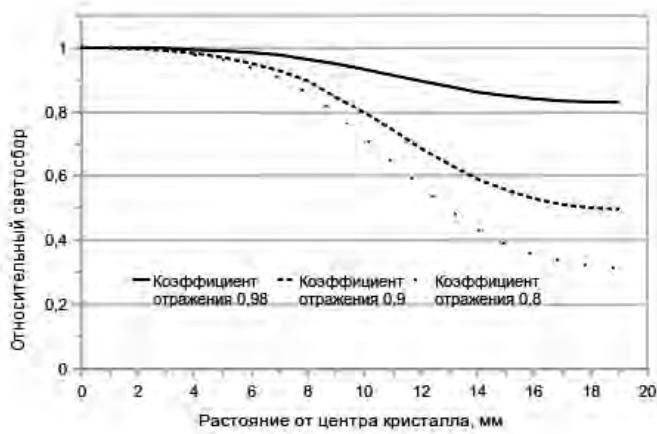
Из приведенных зависимостей видно, что однородность светособирания, характеристикой которой может служить значение относительного светособирания на краях кристалла (то есть отношение коэффициента светособирания на краях к его значению в центре кристалла), сильно зависит от коэффициента отражения от засыпки.

Правильным подбором параметров модели удалось добиться хорошего совпадения расчетных и экспериментальных данных.

На втором этапе программно-имитационных экспериментов исследовалась функциональная зависимость коэффициента светособирания от диаметра и толщины кристалла при неизменных размерах входного окна фотоприемника.



а)



б)

Рис. 2. Коэффициент светосбора (нормированный по максимуму в центре кристалла): а) зависимость от длины свободного пробега фотона в кристалле; б) зависимость от коэффициента отражения от засипки

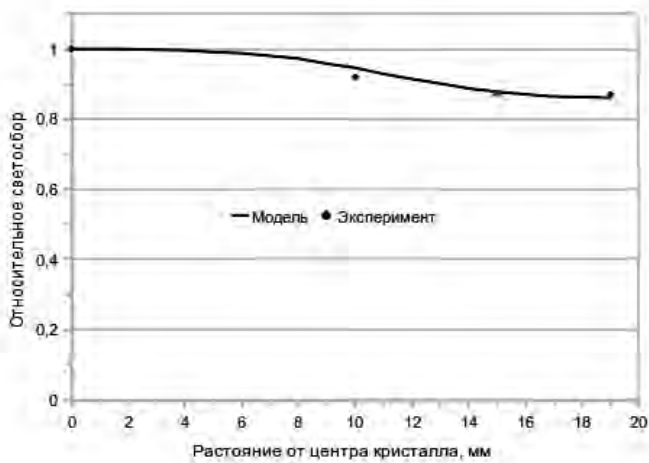


Рис. 3. Сравнение усредненных экспериментальных и модельных данных, полученных при средней длине пробега 250 мм и коэффициенте отражения 0,985

Ниже приведена зависимость относительного светособирания от диаметра выходного окна (рис. 4).

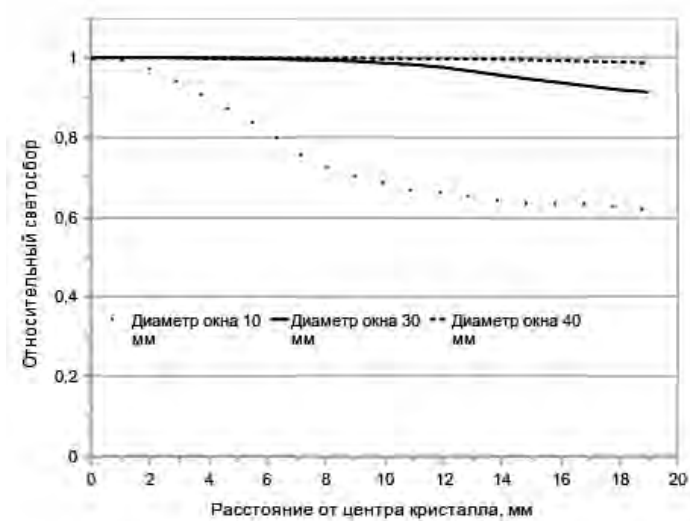


Рис. 4. Зависимость светособирания от диаметра выходного окна

Для полученных кривых характерно наличие перегиба в точке, соответствующей краю входного окна. Также очевидно, что чем больше отношение диаметра входного окна к диаметру кристалла, тем однороднее светособирание.

Рассматривалась также зависимость светособирания в цилиндрическом кристалле от отношения высоты кристалла к его диаметру (рис. 5).

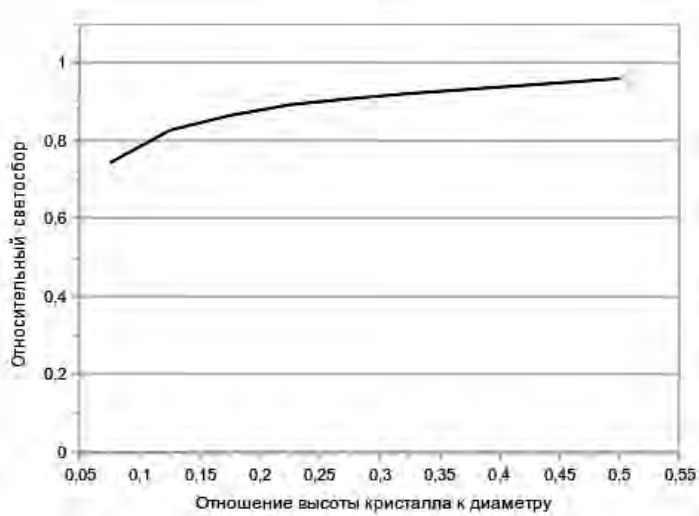


Рис. 5. зависимость светособирания у боковой границы кристалла от отношения его высоты к диаметру

Чем выше это отношение, тем однороднее светособирание вдоль радиуса кристалла, однако меньше однородность по глубине кристалла. При увеличении толщины кристалла становится отчетливо видно, что светособирание в центре кристалла более эффективно у нижней границы кристалла, в то время как у краев в меньшей степени выражена обратная зависимость (рис. 6).

Следует отметить, что при увеличении однородности светособирания путем увеличения относительной толщины кристалла уменьшается коэффициент светособирания,

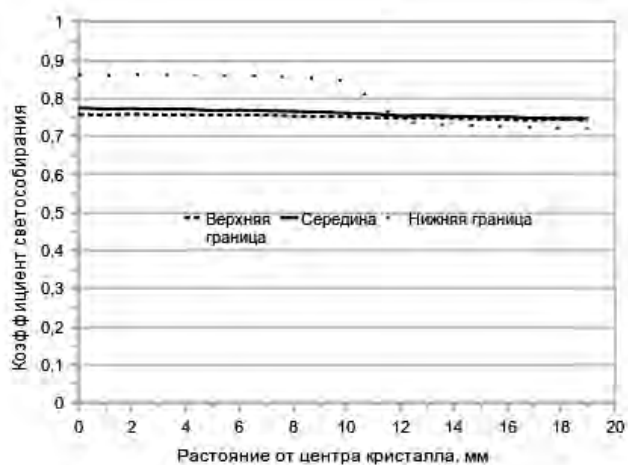


Рис. 6. Модельная зависимость коэффициента светособирания от глубины для кристалла с отношением ширины к диаметру 0,5

что, по всей видимости, связано с увеличением средней длины пробега фотона до попадания на входное окно и с увеличением количества отражений от границ, что ведет к увеличению вероятности поглощения фотона веществом сцинтиллятора и на границах.

Выводы

Данная модель отлично описывает экспериментальные данные и может быть использована для моделирования процессов светособирания при различных геометрических и оптических параметрах сцинтилляционных блоков детектирования. Благодаря гибкости GEANT4 в модель легко может быть добавлен световод, несколько ФЭУ и т.п.

В ходе работы выполнена проверка модели на адекватность путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Установлены некоторые закономерности светособирания в плоских цилиндрических кристаллах. Так, однородность светособирания растет с увеличением диаметра входного окна ФЭУ, причем точка перегиба графика зависимости светособирания от радиальной координаты приходится на его край. По радиальной координате также отмечено увеличение однородности светособирания при увеличении толщины кристалла, однако, за счет уменьшения однородности по глубине и коэффициента светособирания. Проиллюстрировано влияние коэффициента отражения от засыпки на параметры светособирания. Показано, что незначительное уменьшение коэффициента отражения приводит к резкому уменьшению коэффициента светособирания у боковой границы кристалла по сравнению со значением в центре кристалла и, соответственно, к значительной неоднородности светособирания.

Результаты моделирования позволяют оценить вклад процессов светособирания в энергетическое разрешение сцинтилляционных блоков детектирования, а также потери световой энергии в оптических узлах, с целью создания сцинтилляционных блоков, обладающих требуемыми характеристиками.

Литература

1. Калужный А.В. Исследование методов контроля скрытых пустот различными способами. // Адаптивные системы автоматического управления. Региональный межвузовский сборник научных трудов. -Вып. 10(30).-Днепропетровск, 2007.-С. 54-62.
2. C. Moisan, F. Cayouet, and G. McDonald. DETECT2000: the object oriented C++ language version of DETECT: a program for modeling optical properties of scintillators. Department of Electrical and Computer Engineering at Laval University. Quebec City, Quebec, Canada.
3. Войлов П.Ю. Системная модель процесса регистрации гамма-квантов ионизирующего излучения сцинтилляционными детекторами. // 3-я международная научно-техническая конференция "Информационная техника та электромеханика" ИТЕМ-2005.
4. К задаче о светособирании в сцинтилляционных детекторах / Клочан Д. С.; НИПКИ "Искра", Луганск, 2010. - 9с.: ил. - Библиогр.: 7 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 18.10.10, №104 – Ук. 2010.

5. Калюжный А.В. Задача оптимизации геометрии сцинтилляционного кристалла детектора скрытых пустот / Калюжный А.В., Войлов П.Ю., Кочергин А.В. // Восточно – Европейский журнал передовых технологий, №6/7 (36), 2008г., с.7-10, г.Харьков.

Клочан Д.С., Калюжный А.В., Войлов П.Ю.

Вивчення особливостей світлозбирання у плоских сцинтиляційних кристалах із малим відношенням площі вхідного вікна фотоприймача до вихідного вікна детектора

Виконано моделювання процесів світло збирання для різних геометричних та оптичних параметрів збірки «кристал-ФЕП». Виявлено деякі закономірності світло збирання у плоских циліндричних кристалах.

Ключевые слова: сцинтиляційний кристал, коефіцієнт світлозбирання, ФЕП, моделювання.

Klochan D.S., Kaluzhnyi A.V., Voylov P.Y.

Exploration of light collection process features in flat scintillation crystals with small ratio of PMT input window area to output window of detector

We performed simulation of light collection processes in various geometrical and optical parameters of assemblage “crystal-PMT”. The article describes some regularities of light collection processes in flat cylindrical crystals.

Keywords: scintillation crystal, light collection coefficient, PMT, modeling.

Войлов Павел Юрьевич – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории информационно-аналитического моделирования НИПКИ «Искра» (г.Луганск);

Калюжный Андрей Валериевич – младший научный сотрудник отдела специализированных технологий НИПКИ «Искра» (г.Луганск);

Клочан Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории информационно-аналитического моделирования НИПКИ «Искра» (г. Луганск).

Рецензент: Ульшин В.А., д.т.н., проф., заведующий кафедрой системной инженерии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

UDC 004.932:620.179.152

Tetiana Malykhina

Kharkiv

USAGE OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY FOR VISUALIZATION AND CHARACTERIZATION OF MICROSTRUCTURES

This paper presents an example of the software which is a part of Xradia Micro XCT system designed to explore a variety of samples in the micrometer range. The results of visualization and characterization of the micrometer range sample are presented. The Xradia MicroXCT facility was used to study the sample. The ImageJ 1.44 and VolSuite_3.3.18 software was used for visualization and analysis. The magnetic read/write head from a PC hard drive disk was chosen as a sample for research. Work was carried out at the Physics Department of the University of Jyväskylä, FINLAND.

Key words: X-ray computed tomography, Xradia MicroXCT, 3D visualization.

The statement of the problem

The X-ray computer tomography is widely used as a nondestructive method of three-dimensional imaging. The word “tomography” is derived from the Greek “tomos” which means “a slice” or “a cross section” and from word “graphein” which means “to write”.

The aim of this paper is to introduce the existing hardware and software for the study of samples in the micron range to the reader.

MicroCT is emerging as a new method for non-invasive 3D computerized X-ray tomographic imaging of objects at the microscopic level. In microtomography the term “micro” is used to indicate that the pixel sizes of the reconstructed cross sections are in micrometer range.

The first X-ray microtomography system was designed and built by J.C. Elliott and S.D. Dover in the early 1980s. The first published X-ray microtomographic images were reconstructed slices of a small tropical snail, with pixel size about 50 micrometers [1].

Analysis of recent research and publications

Now there are several companies that produce X-ray scanners: SkyScan, Xradia, Phoenix, Nikon, Siemens, Philips, BioScan, etc. More than 500 micro-CT systems exist now. The technology can be used for many applications. The most applications of micro-CT devices are: medical applications, life science, development of new product, process control, metrology, semiconductor advanced packaging failure analysis, oil and gas drilling feasibility, prediction of material performance and advanced material analysis. For example, semiconductor package development and failure analysis engineers have used X-ray microtomography to verify micron size defects without the need for any physical delayering or cross sectioning.

The X-ray computed tomography uses X-rays to create cross-sections of a 3D-object. These cross-sections can be used to recreate a virtual model of the original model. The mathematical procedure of image reconstruction is the important part of the tomographic studies. The main principle of a MicroXCT scanning method is following. System captures multiple images at many different angular positions of the object. These images are called projections. Each projection image carries a piece of information about the object geometry. The recorded intensities in each projection are maps of changes in thickness and attenuation coefficient along the beam of X-ray at the particular angle. The different slice images of the object can be reconstructed from the collected projections.

The main goal of this work and the research method

The main goal of this work was the definition the optimal parameters for the Xradia MicroXCT using the magnetic read/write head from a PC hard drive disk as a test sample. The read/write head is a complex structure consisting of many details (Fig. 1). These details are very small and they are made by lithography. Therefore this sample was suitable for study by X-ray microtomography.

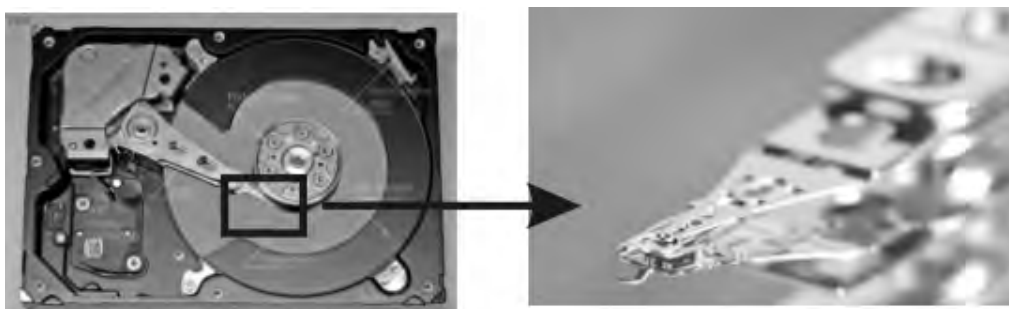


Fig. 1. The read/write head from a failed PC hard disk

Studies were carried out at the Physics Department of the University of Jyvaskyla. The Xradia MicroXCT was used for the study of the sample.

Xradia's computer tomography technology has been used by scientists and engineers to provide insight into the internal structure of 3D samples in a large variety of applications. Xradia's MicroXCT provides an unparalleled combination of contrast and resolution for all types of advanced materials. With spatial resolution down to 1 micron for a variety of different sample types and sizes, the MicroXCT will provide true insight through 3D. Particularly, the Xradia MicroXCT allows studying internal structure of my sample and providing 3D visualization of results. The Xradia MicroXCT uses special software for their work. This software controls some important parameters for experiment, and sets the out parameters for visualization [2].

The experiment was carried out in order to obtain 250 images, which takes about 40 minutes of time.

Results of reconstruction

All results of experiment were saved to the hard disk of computer which is part of the Xradia MicroXCT for further processing. The ImageJ and VolSuite programs [3], [4] were used for visualization and data processing in offline mode. Some snapshots from VolSuite program that produce 3D visualization of the sample are presented (Fig. 2).

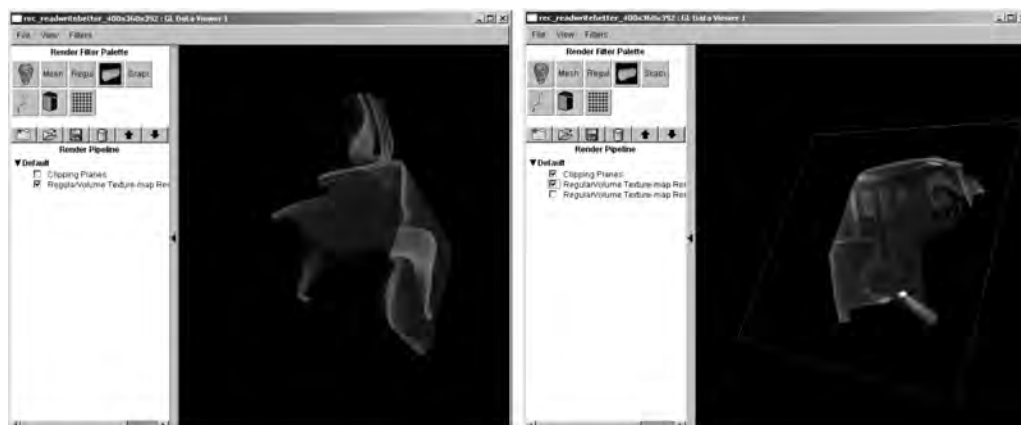


Fig. 2. VolSuite program produce 3D visualization of the sample

The VolSuite program reconstructs the sample using *.raw – file that contains 392 slices with 400x360 pixels.

The file “readwrite_8bit_501x501x250.raw” contains 250 grayscale slices for reconstructing the image. This file was imported to the ImageJ program (Fig.3).



Fig. 3. The 3D visualization of read/write head using the ImageJ program

The ImageJ program allows one to play movie-file for the visualization of the sample. This movie-file is reconstructed from images previously recorded during the analysis of the sample. The scale was chosen based on the known pixel size 4.39 micrometers (Fig.4).

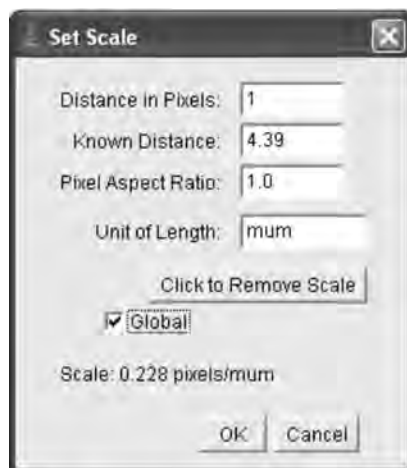


Fig. 4. Setting the scale

Using the special software such as ImageJ or VolSuite programs one can measure various parameters of the sample. For example, I have received the value of the contact area (Fig. 2) using menu “Analyze” -> “Set Measurement” and than “Measure”. It was found that the contact area is equal to 4779.5 square micrometers.

To measure the thickness of wires at the tail area (Fig. 5) the “multi-point selection” tool was used.



Fig. 5. Wires at the tail area

As a result of measurement the thickness of wires is 21.95 micrometers.

Conclusion

The optimal parameters of the Xradia MicroXCT X-ray tomograph were experimentally chosen. The 3D visualization of the sample was carried out. Some parameters of the sample such as the area of the contact and the thickness of wires at the tail area were defined using the special software.

I want to thank to the administration of the Department of Physics of Jyvaskyla University and personally Dr. Markko Myllys for providing equipment and work supervision.

References

1. J.C. Elliott and S.D. Dover. X-ray Microtomography. J. Microscopy 126, pp. 211-213, 1982.
2. High Resolution 3D X-Ray Microscope Systems, (<http://www.xradia.com>)
3. Image Processing and Analysis in Java, (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).
4. ImageJ User Guide. (https://tomopedia.phys.jyu.fi/index.php/ImageJ_en).

Малыхина Т.В.

Использование рентгеновской микротомографии для визуализации и определения параметров микроструктур

В данной работе представлен пример работы с программным обеспечением, входящим в состав аппаратно-программного комплекса Xradia Micro XCT, предназначенного для исследования различных образцов в микронном диапазоне. Представлены результаты визуализации и анали-

за части магнитной головки чтения/записи жесткого диска персонального компьютера. Для визуализации и анализа использовались программы ImageJ 1.44 и VolSuite_3.3.18. Работа выполнялась на физическом факультете университета города Ювяскюля, Финляндия.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, Xradia MicroXCT, 3D визуализация

Малихіна Т.В.

Використання рентгенівської мікротомографії для візуалізації та визначення параметрів мікроструктур

У даній роботі представлений приклад роботи з програмним забезпеченням, що входить до складу апаратно-програмного комплексу Xradia Micro XCT, призначеного для дослідження різних зразків у мікронному діапазоні. Представлені результати візуалізації та аналізу частини магнітної головки читання/запису жорсткого диска персонального комп'ютера. Для візуалізації та аналізу використовувалися програми ImageJ 1.44 і VolSuite 3.3.18. Робота виконувалася на фізичному факультеті університету міста Ювяскюля, Фінляндія.

Ключові слова: рентгенівська комп'ютерна мікротомографія, Xradia MicroXCT, 3D візуалізація.

Малыхина Татьяна Васильевна – старший преподаватель кафедры электроники и управляющих систем Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (г. Харьков).

Рецензент: Немченко Константин Эдуардович, докт. физ.-мат. наук, профессор, декан физико-энергетического факультета Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (г. Харьков).

УДК 004.716

В.Ю. Солдатенко, Э.В. Жариков

г. Луганск

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На основе обзора передовых и получивших широкое применение беспроводных технологий передачи данных предложен гибкий метод выбора оптимальной технологии, позволяющей максимально достичь цели проектирования в каждом конкретном случае. Ист. 4.

Ключевые слова: беспроводные технологии, метод весовых коэффициентов, метод экспертных оценок, MMDS, FSO, WiFi, WiMax.

Постановка задачи. На данный момент в открытых источниках не достаточно описаны методики комплексной оценки беспроводных технологий. Часто при проектировании беспроводных сетей выбор технологии зависит во многом только от предпочтений инженера, наличия финансирования или же популярности технологии.

Необходимо отметить, что технические характеристики, стандарты беспроводной связи, экономические факторы, актуальность технологии и многие другие очень важны при осуществлении конкретных проектов со своими специфическими целями и требованиями. Технические характеристики имеют четкие количественные выражения, экономические факторы можно выразить аналитически в виде значений коэффициентов анализа, но полную интегральную оценку преимуществ той или иной технологии невозможно получить без учета качественных характеристик. Их оценка зачастую носит весьма субъективный характер.

Предлагаемая методика на основе экспертных оценок с применением весовых коэффициентов позволяет более объективно и обоснованно делать выбор беспроводной технологии при проектировании сетей различного масштаба.

Краткий обзор беспроводных технологий. Для разработки методики и её апробации возьмем следующие беспроводные технологии: MMDS (Microwave Multipoint Distribution) [1], FSO (Free Space Optics) [2], Wi-Fi (Wireless Fidelity) [3], WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [3] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики технологий

Технология	Пропускная способность, Мбит/с	Радиус покрытия, м	Рабочая частота, ГГц
MMDS	56	60 000	2,5-2,7
FSO	10 000	2 000	59-64
WiFi	300	100	2,4-2,5 и 5
WiMAX	1 000	10 000	1,5-11

Целью статьи является разработка методики сравнительного анализа беспроводных технологий позволяющей получать интегральную оценку каждой технологии на основании требований и особенностей конкретных проектов сетей.

Материалы и результаты исследования. В процессе разработки проекта сети с беспроводной передачей данных возникает проблема выбора технологии, удовлетворяющей определенным критериям и лучше всего подходящей для решения задачи. При выборе той или иной технологии необходимо определить ключевые характеристики будущей системы, а именно, на какое расстояние нужно передавать данные, какую пропускную способность должна обеспечить сеть передачи данных, какая планируется топология сети.

Основные характеристики включают в себя численные величины, анализ которых объективно может отразить превосходство одной технологии перед другой в каждом конкретном случае проектирования. Однако, немаловажными являются субъективные оценки эксперта-инженера, проектирующего сеть, основанные на опыте, а также его знания желаемых характеристик и возможностей, всех технических особенностей проектируемой сети, которые далеко не всегда возможно отразить в физических величинах.

Методы, основанные на предположении о том, что на базе мнений специалистов в определенной области знаний можно построить адекватную картину будущего развития с учетом всех возможных отклонений получили название методов экспертиз или методов экспертных оценок [4].

В основе использования экспертных методов лежат предметные знания специалистов, умение обобщить свой опыт исследований и разработок в определенной предметной области. Наличие у эксперта так называемой «практической мудрости», дальновидности в определенной области знаний и практической деятельности позволяет сократить количество вариантов при выборе правильной стратегии поиска решения.

На первом этапе необходимо определить критерии оценки и получить экспертные оценки по шкале от 1 до 10 для каждого из них. При выборе той или иной беспроводной технологии базовыми можно считать следующие характеристики для оценки: пропускная способность, радиус покрытия, рабочая частота, необходимость прямой видимости, доступность и актуальность. При опросе эксперта получены следующие оценки (табл. 2) на примере проектирования сети в масштабе города.

На втором этапе присваиваем коэффициенты критериям в соответствии с их значимостью для проектируемой системы. Для каждой технологии подсчитываем суммарный балл по формуле (1) [5]:

$$S_j = \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i, \tag{1}$$

где $j = \overline{1, z}$ и $i = \overline{1, n}$

- j – порядковый номер технологии;
 z – количество рассматриваемых технологий;
 i – порядковый номер критерия;
 n – количество критериев;
 S – итоговый балл технологии;
 k – весовой коэффициент критерия;
 x – оценка эксперта соответствия технологии текущему критерию.

Представим результаты расстановки весовых коэффициентов и расчета итоговых баллов для каждой технологии в виде таблицы (табл. 3) и посмотрим, будут ли результаты анализа по предлагаемой методике отличаться от предварительных выводов относительно выбора технологии беспроводной передачи данных для проекта данной сети.

Т а б л и ц а 2

Экспертные оценки технологий

Технология	Оценка					
	Пропускная способность	Радиус покрытия	Рабочая частота	Отсутствие прямой видимости	Доступность	Актуальность
MMDS	2	10	3	0	10	3
FSO	10	6	10	0	2	9
Wi-Fi	5	2	4	10	10	8
WiMAX	8	8	9	10	9	9

Т а б л и ц а 3

Результаты анализа

Технология	Пропускная способность, 30%	Радиус покрытия, 40%	Рабочая частота, 8%	Отсутствие прямой видимости, 10%	Доступность, 8%	Актуальность, 4%	Суммарный балл
MMDS	0,6	4	0	0	0,8	0,12	5,8
FSO	3	2,4	1	0	0,16	0,36	6,7
WiFi	1,5	0,8	0	1	0,8	0,32	4,7
WiMAX	2,4	3,2	1	1	0,72	0,36	8,4

Результаты анализа беспроводных технологий по разработанной методике показали, что оптимальным для рассматриваемого примера является применение технологии WiMAX. Лидирующие позиции эта технология получила по следующим критериям: радиус покрытия, рабочая частота, отсутствие прямой видимости, актуальность. Более достоверные результаты анализа по этой методике можно получить привлекая к анализу большее количество экспертов.

Таким образом, предлагаемая методика дает возможность более детально подойти к вопросу подбора беспроводной технологии. Благодаря расширению количества критериев и увеличению количества экспертов данная методика позволит более качественно и аргументированно, чем выбор на основе базовых характеристик, выполнять проектирование беспроводных сетей различного назначения.

Л и т е р а т у р а

1. ММДС: Как это работает?. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mmds48.ru/abonents/mmds/work/>- Название с экрана.
2. FSO технология. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://comsvit.com.ua/articles/7/>- Название с экрана.
3. WiMAX. [Электронный ресурс] / Материал из Википедии — свободной энциклопедии. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Wimax>. - Название с экрана.
4. Беркли Д. Сочинения. М.: Мысль, 2000. – 512 с.
5. В.Б. Коробов, Анализ данных. Архангельск, с. 66, 2005 г

References

1. MMDS: Kak jeto rabotaet?. [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://mmds48.ru/abonents/mmds/work/>- Nazvanie s jekrana.
2. FSO tehnologija. [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://comsvit.com.ua/articles/7/>- Nazvanie s jekrana.
3. WiMAX. [Jelektronnyj resurs] / Material iz Vikipedii — svobodnoj jenciklopedii. Rezhim dostupa: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Wimax>. - Nazvanie s jekrana.
4. Berkli D. Sochinenija. M.: Mysl', 2000. – 512 s.
5. V.B. Korobov, Analiz dannyh. Arhangel'sk, s. 66, 2005 g

Жаріков Е.В., Солдатенко В.Ю.

Методика порівняльного аналізу бездротових технологій

На основі огляду передових і широкоживаних бездротових технологій передачі даних запропоновано гнучку методику вибору оптимальної технології, що дозволяє максимально досягти цілі проектування у кожному конкретному випадку. Дж. 4.

Ключові слова: бездротові технології, метод вагомих коефіцієнтів, метод експертних оцінок, MMDS, FSO, WiFi, WiMax.

Zharikov E.V., Soldatenko V.Y.

Methods of the wireless technologies comparative analysis

Based upon a short review of recent and wide used wireless technologies of data transmission the flexible method, which allows to achieve project goals more efficiently in each specific case, is offered in the article. Ref. 4.

Keywords: wireless technologies, the gravimetric coefficients method, the method of expert estimations, MMDS, FSO, WiFi, WiMax.

Жариков Эдуард Вячеславович – к.т.н., доцент кафедры “Системная инженерия” Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Солдатенко Владимир Юрьевич – студент факультета компьютерных наук и технологий Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: Ульшин В.А., д.т.н., проф., заведующий кафедрой системной инженерии Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СИНТЕЗА ВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В статье проанализированы основные пути повышения эффективности параллельных вычислительных систем. Рассмотрены возможности использования семантико-числовых структур для представления временных моделей управления параллельным процессом и основные этапы синтеза. Изложенные в работе результаты, позволяют рассмотреть применение средств спецификации параллельной реализации алгоритмов, технологий формализованного синтеза семантико-числовой спецификации параллельных программ для многопроцессорных ЭВМ. Проведенные исследования показывают целесообразность применения семантико-числовых структур для формализации синтеза временной модели управления параллельным процессом.

Ключевые слова: временная параллельная модель, числовая спецификация программы, граф программы, семантико-числовая структура, Си-граф.

Постановка проблемы

Основными путями повышения эффективности вычислительных систем (ВС) являются [1,2,4]:

- разработка новой элементной базы с улучшенными характеристиками;
- переход к решению задач на основе методов мультипараллельной обработки данных;
- создание и применение параллельных ЭВМ новых классов.

Первый путь связан с высокой трудоемкостью, стоимостью и большими временными затратами на создание новых технологий разработки элементной базы и производства цифровых устройств.

Второй путь связан с необходимостью разработки новых технологий синтеза параллельных цифровых устройств и параллельных программ и не требует создания дорогостоящих технологий производства. В настоящее время повышение эффективности вычислительных средств за счет применения методов параллельной обработки считается наиболее перспективным решением задачи повышения эффективности.

Мультипараллельная обработка заключается в организации процесса выполнения алгоритмов на основе применения всех известных и новых методов параллельной обработки или рациональной совокупности методов параллельной обработки информации, адекватной реализуемым алгоритмам и заданным тактико-техническим требованиям.

Одной из задач, которая должна быть решена при организации мультипараллельного выполнения алгоритмов является синтез моделей управления динамикой реализации параллельных вычислительных процессов. Анализ литературы [1-3] показывает, что методы решения этой задачи проработаны недостаточно, однако ее эффективное решение имеет исключительно важное значение для организации параллельных вычислительных процессов. Изложенное выше определяет *актуальность* и практическую значимость разработки эффективных методов синтеза временных моделей управления параллельными вычислительными процессами.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время одним из способов спецификации и визуализации статических алгоритмов, используемых в системах автоматизации проектирования (САПР), является применение графов информационной зависимости реализации алгоритма (графы алгоритма), представляющие собой ориентированные графы и включающие [5-7]:

- 1) множество входных вершин с перенумерованными входами, не имеющие входных стрелок и интерпретирующие интерфейсные входы;

- 2) множество входных вершин перенумерованными выходами, не имеющие входных стрелок и интерпретирующие декларированные в программе данные;
- 3) множество внутренних вершин с перенумерованными выходами, соответствующие операциям/функциям языка Си, представленным в теле программы;
- 4) множество ориентированных ребер (стрелок), соединяющих вершины и отражающие связи между ними;
- 5) множество выходных вершин перенумерованными выходами, не имеющие выходных стрелок и интерпретирующие интерфейсные выходы.

У произвольной вершины есть сопряженное множество операторов $S_j=S_j(P_j)$, результаты, выполнения которых, использует P_j при своей реализации, а так же внешнее множество операторов W_j , которое использует результаты выполнения P_j при своей реализации. В том случае, когда параллельная программа написана на языках программирования С или С++, графическая спецификация алгоритма называется Си-графом.

Для графической спецификации таких процессов целесообразно использовать временные параллельные граф-схемы алгоритмов (ВПГС), содержащие заданную в Си-графе информацию с указанием моментов времени начала выполнения операторов и размещением одновременно начинающихся операторов на соответствующем временном ярусе [3, 7]. Формальная спецификация Си-графов и ВПГС обеспечивается структурами семантико-числовой спецификации: базовая структура BF операторов и структура CF связей операторов [3, 8, 9].

Структура BF включает следующие массивы данных

$$BF = (N, TYP, NSJ, SJD, BJ, NWJ, WJD, RES), \quad (1.1)$$

где N – номер вершины графа; TYP – тип инструкции Си-программы, интерпретируемой соответствующей вершиной графа; NSJ – указатель на начало цепочки номеров вершин графа, образующих сопряженное множество конкретной вершины; SJD – мощность сопряженного множества для вершины; BJ – номер естественной части графа алгоритма, к которой принадлежит конкретная вершина; NWJ – указатель на начало цепочки номеров вершин графа, образующих внешнее множество вершины; WJD – мощность внешнего множества для вершины; RES – имя входа данных, исходной переменной, константы, символа операций языка Си, имя промежуточного и окончательного результата решения задачи, имя выхода, а также имя оператора «stop».

Структура CF включает следующие массивы данных

$$CF = (N, JSD, SPDJ, SNWIH, SNWHO, JWD, WPJD, WNWHO, WNWIH), \quad (1.2)$$

где N – номер связи по данным и по управлению между операторами алгоритма, представляемого исходной Си-программой; JSD – указатель на продолжение цепочки номеров вершин графа, образующих сопряженное множество вершины для рассматриваемой вершины или модуля схемы; $SPJD$ – сопряженное множество вершины для рассматриваемой вершины; $SNWIH$ – номер выхода сопряженной вершины, связанного с входом рассматриваемой вершины; $SNWHO$ – номер входа вершины, связывающего эту вершину с входом соответствующей сопряженной для субъекта вершины; JWD – указатель на продолжение цепочки номеров вершин графа, образующих внешнее множество W вершины рассматриваемой вершины; $WPJD$ – внешнее множество вершины; $WNWHO$ – номер входа вершины, являющейся внешней для рассматриваемой вершины; $WNWIH$ – номер выхода рассматриваемой вершины, связывающего ее с внешней вершиной.

Таким образом, для разработки эффективных методов синтеза временных моделей управления параллельными вычислительными процессами наиболее целесообразным является применение структур семантико-числовой спецификации для формального описания и Си-графов/ ВПГС для графической спецификации.

Постановка задачи

Задача исследования формулируется следующим образом: разработать основные этапы синтеза временных моделей управления параллельными вычислительными про-

цессами для неразветвляющейся задачи. Исходными данными для исследования являются: Си-программа алгоритма, временная параллельная модель (ВПГС) процесса выполнения алгоритма, времена выполнения операций/функций языка Си++, структуры семантико-числовой спецификации BF, CF, TF . Данная задача реализована синтезированной моделью управления параллельным вычислительным процессом, представленная структурами семантико-числовой спецификации и временной параллельной граф-схемой алгоритма.

Результаты исследования

Назначением синтезируемой временной модели управления параллельным вычислительным процессом является временная синхронизация параллельного вычислительного процесса. Основные этапы методики синтеза параллельной временной модели управления параллельным вычислительным процессом представлены на рис. 1.

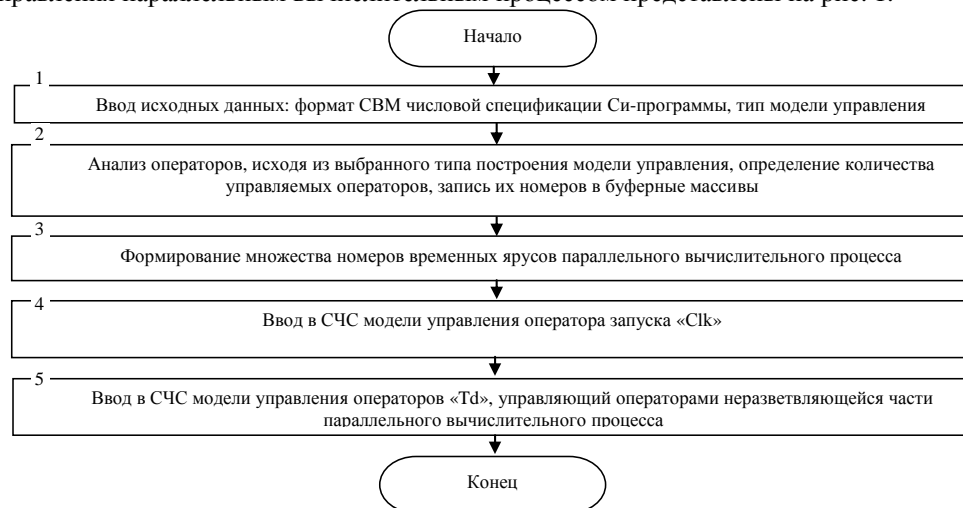


Рис. 1. Основные этапы методики синтеза параллельной временной модели управления параллельным вычислительным процессом

Для обеспечения временной синхронизации модель управления должна содержать операторы следующих типов: оператор запуска модели управления «Clk»; множество операторов временной задержки «Td», отражающие длительности выполнения операторов исходной временной модели процесса и обеспечивающие управление началом выполнения временных операторов различных временных ярусов процесса. Схема их соединения должна быть идентична схеме соединения временных операторов параллельной модели заданного вычислительного процесса.

Разработка модели управления включает следующие этапы.

На этапе 1 (символ 2, рис.1) определяются типы временных операторов параллельной модели процесса: комбинационного типа (без элементов памяти) и операторов с индивидуальной памятью данных (арифметико-комбинационного типа).

На этапе 2 (символ 3, рис. 1) выполняется формирование множества номеров временных ярусов параллельного вычислительного процесса, содержащих операторы, которые необходимо синхронизировать.

На этапе 3 (символ 4, рис. 1) осуществляется ввод в графическую и семантико-числовую спецификацию модели управления оператора запуска «Clk».

На этапе 4 (символы 4, рис. 1) формируются множества номеров операторов временной задержки со значением «Td», равным временному расстоянию между парами смежных синхронизируемых ярусов параллельного вычислительного процесса.

На этапе 5 (символ 5 рис. 1) происходит формирование формата СВМ операторов «Td» соответствующих каждому из неразветвляющихся участков программы.

На этапе 6 (символы 5 рис. 1) выполняется формирование формата СВМ операторов «Td», соответствующих каждому из неразветвляющихся участков программы, и операторов типов «bp», «brv», расположенных на соответствующих временных ярусах исходной модели параллельного вычислительного процесса.

Поясним содержание основных этапов синтеза на реальном примере неразветвляющегося алгоритма, представленном Текстом 1.

Текст 1 – Исходный текст разветвляющейся Си-программы

```
#include <stdio.h>
void main(void) {
    int a,b,c,d,e,f,m,x,y;
    scanf("%d %d %d\n",&a,&b,&c);
    scanf("%d %d %d\n",&d,&e,&f);
    m = b * d - a * e;
    x = ( b * f - c * e ) / m;
    y = ( a * f - c * d ) / m;
    printf("%4d %4d\n",x,y); }

```

Временная параллельная модель процесса выполнения алгоритма, отображающая графическую спецификацию, показана на рис. 2. В данном исследовании использовались значения времени выполнения операций/функций, определенные в Таблице 1.

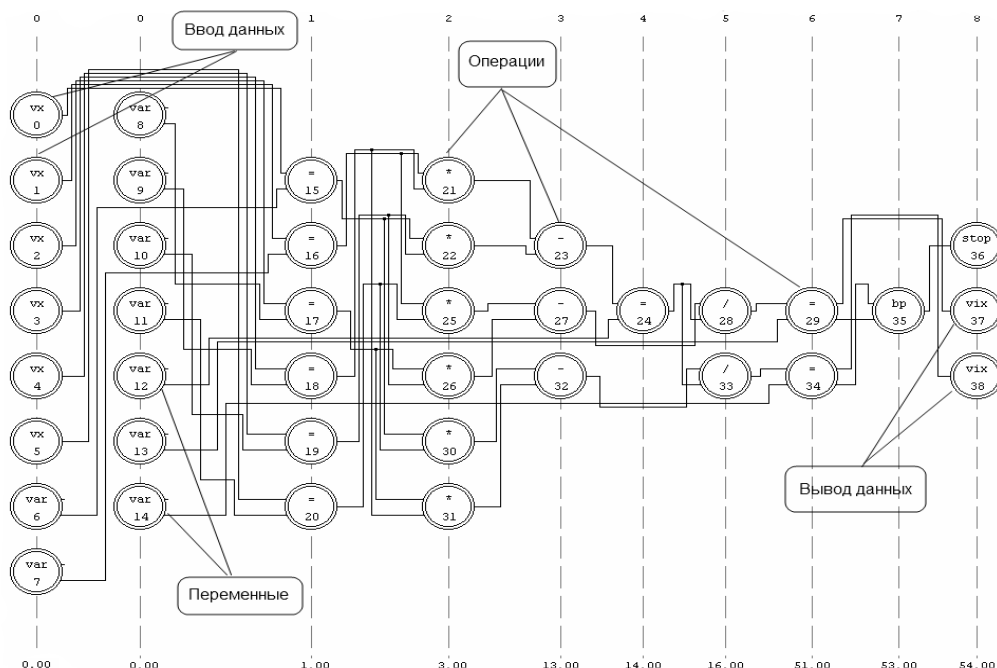


Рис. 2. Временная параллельная модель процесса выполнения алгоритма

Т а б л и ц а 1

Длительность выполнения (t_j^0) операций различных типов (typ)

typ	vx	=	*	/	vix	bp	-	stop
t_j^0	1.00	2.00	10.00	35.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Для рассматриваемого примера построение временной модели управления заключается во вводе на 0-ярус исходной временной модели оператора «Слк» (P_{39}), подающего стартовый

начальный сигнал, непосредственно управляющий начальной инициализацией вводимых данных и операторами присвоения на первом ярусе временного модели, а также на оператор «Td», который задает временную задержку для запуска следующего яруса процесса.

Построение арифметико-комбинационной модели управления основано на том, что наша предполагаемая исходная модель будет реализована на комбинационных элементах (т.е. элементах с памятью). Исходя из данной информации о требуемой элементной базе, автоматизировано синтезируется числовая спецификация параллельной модели управления параллельным вычислительным процессом и соответствующая ей визуализация (рис. 3). За основу BF и CF берется уже созданная числовая спецификация исходной Си-программы.

Данная модель управления состоит из 4 операторов. Т.к. «Clk» является стартовым оператором модели управления, то его N = 39 из BF, т.к. в основной Си-граф входит 38 оператор. Данный оператор управляет операторами P₁₅ – P₂₀, задает временную задержку и запускает следующий управляющий оператор временной задержки. Операторы P₄₀, P₄₁ отвечают за сохранение выполняемых данных в памяти. Последний управляющий оператор P₄₂ управляет операторами выводов и остановки процесса реализации («vix», «stop»).

Арифметическая модель управления (рис. 4) строится по аналогии с первым способом построения, с той разницей, что между операторами управления сохранения данных в память (P₄₁) и оператором, управляющим операторами выводов и остановки процесса реализации, ставится оператор (P₅₂), управляющий оператором логического объединения полученных данных («br»). Это обусловлено данным способом построения модели временного управления параллельным временным процессом.

Построение и описание аппарата семантико-числовых структур без учета построения модели управления параллельным вычислительным процессом представлены в работах [7 – 9]. Рассмотрим подробнее состав СЧС спецификации на примере построения арифметической модели управления, представленные таблицами 2, 3.

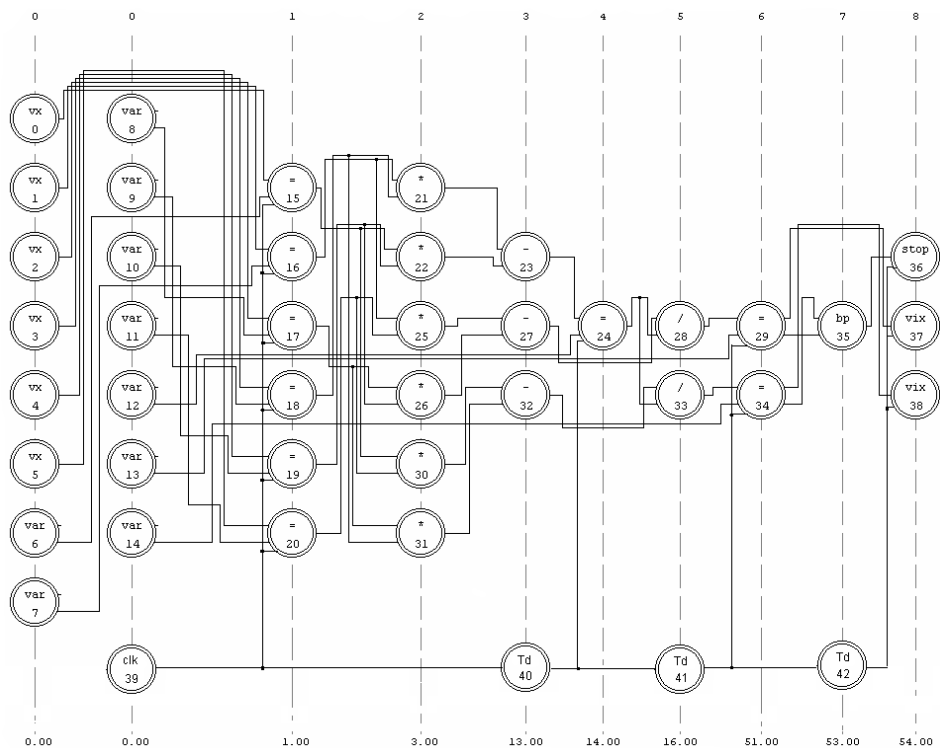


Рис. 3. Си-граф исходной Си-программы с арифметико-комбинационной схемой управления

Состав СЧС спецификации арифметической модели управления представлен структурами BF и CF. Например, для оператора P_{41} сопряженное множество операторов $S(P_{41}) = (S(NSJ = 54) = (40))$; внешнее множество $W(P_{41}) = (W(NWJ = 54), W(NWJ = 55), W(NWJ = 56)) = (29, 42, 34)$. Аналогичные рассуждения справедливы для всех операторов построенного Си-графа. По окончании построения СЧС спецификации производится верификация полученных файлов.

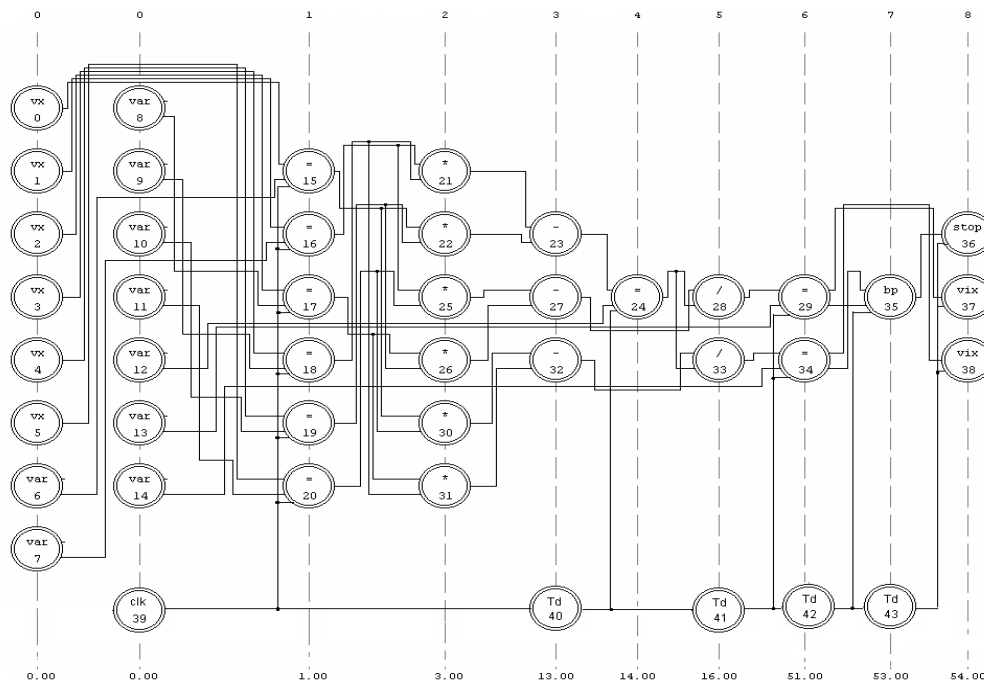


Рис. 4. Си-граф исходной Си-программы с арифметической схемой управления

Таблица 2

Базовый файл Си-графа с арифметикой схемой управления (достроенная спецификация арифметической модели управления)

N	TYP	NSJ	SJD	BJ	NWJ	WJD	RES
39	284	-1	0	0	45	7	clk
40	210	51	1	0	52	2	Td
41	210	54	1	0	54	3	Td
42	210	56	1	0	57	2	Td
43	210	60	1	1	59	3	Td

Таблица 3

Файл связи Си-графа с арифметикой схемой управления (достроенная спецификация арифметической модели управления)

N	JSD	SPJD	SNWIH	SNWHO	JWD	WPJD	WNWHO	WNWIH
45	-1	39	0	2	46	15	2	0
46	-1	39	0	2	47	16	2	0
47	-1	39	0	2	48	17	2	0
48	-1	39	0	2	49	18	2	0
49	-1	39	0	2	50	19	2	0
50	-1	40	0	2	51	40	0	0
51	-1	39	0	0	-1	20	2	0
52	-1	40	0	0	53	24	2	0
53	-1	42	0	2	-1	41	0	0

N	JSD	SPJD	SNWIH	SNWHO	JWD	WPJD	WNWHO	WNWIH
54	-1	40	0	0	55	29	2	0
55	-1	43	0	2	56	42	0	0
56	-1	41	0	0	-1	34	2	0
57	-1	39	0	1	58	43	0	0
58	-1	43	0	0	-1	35	2	0
59	-1	40	0	1	60	36	1	0
60	-1	42	0	1	61	37	1	0
61	-1	43	0	0	-1	38	1	0

Выводы

1. При организации мультипараллельного выполнения алгоритмов должны быть решены следующие задачи:

- синтез временных мультипараллельных моделей выполнения алгоритмов;
- синтез моделей управления динамикой реализации параллельных вычислительных процессов.

Анализ литературы показывает, что методы решения второй задачи проработаны недостаточно, однако эффективное решение этой задачи имеет исключительно важное значение для организации параллельных вычислительных процессов.

2. Проведенный анализ известных математических средств спецификации статических и временных моделей параллельных алгоритмов позволяют сделать вывод о целесообразности применения семантико-числовых структур для формализации синтеза временной модели управления параллельным процессом. На основе анализа семантико-числовой спецификации формата СВМ, были разработаны основные этапы синтеза модели управления параллельным вычислительным процессом для неразветвляющейся задачи.

3. Выполненный пример иллюстрирует содержание основных этапов синтеза параллельной временной модели управления параллельным вычислительным процессом для неразветвляющейся задачи и возможность их формализации.

Литература

1. Кривуля Г.Ф., Хаханов В.И. Новые информационные технологии проектирования цифровых систем. 1-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2002. Часть 2-Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – 198с.
2. Г.А. Поляков. Проблемы создания систем совместного автоматического проектирования аппаратно-программных средств для мультипараллельной цифровой обработки данных. 1-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2002. Часть 2 – Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002 – 213с.
3. Поляков Г.А., Толстолужская Е.Г. Аппарат структур временной семантико-числовой спецификации как основа синтеза параллельных аппаратно-программных средств. Всероссийская научная конференция с элементами научной школы для молодежи «параллельная компьютерная алгебра» 11-15 октября 2010 . сборник научных трудов – с.31-39.
4. Поляков Г.А., Адаптивные самоорганизующиеся системы с мультипараллельной обработкой данных-стратегия развития цифровой вычислительной техники в XXI веке. Прикладная радиоэлектроника, Том 1 №1, –Х.: АН ПРЭ.,2002. – 537с.
5. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления.– С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
6. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов.2-е изд., перераб. и доп.–М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.–336с.:
7. Поляков Г.А., Онищенко В.В. Визуализация статико – динамических объектов автоматического проектирования мультипараллельных цифровых устройств // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 7 (35). – С. 169-177.
8. Толстолужская Е.Г. Методика формализованного синтеза мультипараллельных архитектурно-ориентированных моделей решения задач // Моделювання та інформаційні технології. – К.: НАНУ, ІПМЕ ім. Г.С. Пухова. – 2003. – Вип. 22. – С. 206-215.
9. Поляков Г.А., Толстолужский Д.А.. Компиляционная методика верификации статических и динамических объектов автоматического проектирования мультипараллельных цифровых устройств // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АН ПРЭ. – 2005. – Т. 4 , № 2. –С. 161-167.

References

1. Krivulja G.F., Hahanov V.I. Novye informacionnye tehnologii proektirovanija cifrovych sistem. 1-j Mezhdunarodnyj radioelektronnyj forum "Prikladnaja radioelektronika. Sostojanie i perspektivy razvitiya" MRF-2002. Chast' 2 –H.: AN PRJe, HNURJe.,2002. – 198s.
2. G.A. Poljakov. Problemy sozdaniya sistem sovместnogo avtomaticheskogo proektirovanija apparatno-programmnyh sredstv dlja mul'tiparallel'noj cifrovoj obrabotki dannyh. 1-j Mezhdunarodnyj radioelektronnyj forum "Prikladnaja radioelektronika. Sostojanie i perspektivy razvitiya" MRF-2002. Chast' 2 – H.: AN PRJe, HNURJe, 2002 – 213s.
3. Poljakov G.A., Tolstoluzhskaja E.G. Apparat struktur vremennoj semantiko-chislovoj specifikacii kak osnova sinteza parallel'nyh apparatno-programmnyh sredstv. Vserossijskaja nauchnaja konferencija s jelementami nauchnoj shkoly dlja molodezhi «parallel'naja komp'juternaja algebra» 11-15 oktjabrja 2010 . sbornik nauchnyh trudov – s.31-39.
4. Poljakov G.A., Adaptivnye samoorganizujuwiesja sistemy s mul'tiparallel'noj obrabotkoj dannyh-strategija razvitiya cifrovoj vychislitel'noj tehniki v XXI veke. Prikladnaja radioelektronika, Tom 1 №1, –H.: AN PRJe.,2002. – 537s.
5. Voevodin V.V., Voevodin VI.V. Parallel'nye vychislenija.– S.-Pb.: BHV-Peterburg, 2002. – 608 s.
6. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovanija: Ucheb. dlja vuzov.2-e izd., pere-rab. i dop.–M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002.–336s.:
7. Poljakov G.A., Oniwenko V.V. Vizualizacija statiko – dinamicheskikh ob#ektov avtomaticheskogo proektirovanija mul'tiparallel'nyh cifrovych ustrojstv // Sistemi obrobki informacii. – H.: HVU. – 2004. – Vip. 7 (35). – S. 169-177.
8. Tolstoluzhskaja E.G. Metodika foormalizovannogo sinteza mul'tiparallel'nyh arhitekturno-orientirovannyh modelej reshenija zadach // Modeljuvannja ta informacijni tehnologii. – K.: NANU, IPME im. G.S. Puhova. – 2003. – Vyp. 22. – S. 206-215.
9. Poljakov G.A., Tolstoluzhskij D.A.. Kompiljacionnaja metodika verifikacii staticheskikh i di-namicheskikh ob#ektov avtomaticheskogo proektirovanija mul'tiparallel'nyh cifrovych ustrojstv // Prikladnaja radioelektronika. – H.: AN PRJe. – 2005. – T. 4 , № 2. –S. 161-167.

ОСНОВНІ ЕТАПИ СИНТЕЗУ ЧАСОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті проаналізовані основні шляхи підвищення ефективності обчислювальних систем. Розглянуто можливість використання семантико-числових структур для представлення тимчасових моделей управління паралельним процесом і основні етапи синтезу. Викладені в роботі результати, дозволяють розглянути застосування засобів специфікації паралельної реалізації алгоритмів, технологій формалізованого синтезу семантико-числової специфікації паралельних програм для багатопроцесорних ЕОМ. Проведені дослідження показують доцільність застосування семантико-числових структур для формалізації синтезу часової моделі управління паралельним процесом.

Ключові слова: часова паралельна модель, числова специфікація програми, граф програми, семантико-числова структура, Сі-граф.

MILESTONES FOR SYNTHESIS OF TIME MANAGEMENT MODELS PARALLEL COMPUTING PROCESSES

The paper analyzes the main ways to improve computer systems. The possibilities of using semantic and numeric representation of temporary structures for the management of a parallel process models and the main stages of the synthesis. Outlined in the results allow us to consider the application of the specification of the parallel implementation of algorithms, formal synthesis of semantic technologies is a numerical specification of parallel programs for multiprocessor computers. Studies have shown the feasibility of semantic and numeric patterns to formalize the synthesis of the interim management model parallel process.

Keywords: time parallel model, the numerical specification of the program, the program graph, semantic and numerical structure of C-graph.

Толстолужская Елена Геннадиевна – к.т.н., старший научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной системотехники, факультет компьютерных наук, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (г. Харьков);

Артюх Юлия Алексеевна – студентка 5-го курса магистратуры, факультет компьютерных наук, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (г. Харьков).

Рецензент: Юрий Иванович Лосев, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной системотехники, факультет компьютерных наук, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (г. Харьков).

ЗАДАЧА ДІРІХЛЕ ТА ТЕОРЕМИ ВЕЙЄРШТРАССА ПРО НАБЛИЖЕННЯ

Теорема Вейєрштрасса про наближення неперервних функцій поліномами доводиться як наслідок теореми Пуассона про відновлення гармонійної в крузі функції за її граничними значеннями.

Ключові слова: задача Діріхле, інтеграл Пуассона, абелеве середнє, теореми Вейєрштрасса, апроксимація.

Теорема Вейєрштрасса про наближення – джерело теорії апроксимації неперервних функцій тригонометричними та алгебраїчними поліномами. Існує багато доведень цих теорем, частина з яких, наприклад, зводиться до наслідків теорем Стоуна, Фейєра, Бернштейна тощо [1], [2], [3]. Теорема Вейєрштрасса є природним наслідком і теореми про розв’язок задачі Діріхле. До задачі Діріхле зводяться багато-які крайові задачі прикладних наук, зокрема такі, як відшукання потенціала електростатичного поля або температури теп-лового поля в деякій області за потенціалом (або температурою) на межі області. Її найпростіший варіант пов’язаний з одиничним кругом. Саме, треба знайти гармонійну в одиничному крузі $\{z:|z|<1\}$ функцію $u(z)$, котра неперервна в його замиканні та на межі круга співпадає з даною функцією $\psi(\zeta)$, $\zeta = e^{i\varphi}$, $\varphi \in [0, 2\pi]$. Відповідь міститься в наступному твердженні [4].

Теорема (Пуассон). *Нехай $\psi(\zeta) = \psi(e^{i\varphi})$ --- будь-яка неперервна на колі $\gamma: |\zeta|=1$ функція. Нехай $z = re^{i\theta}$, $r < 1$,*

$$u(z) = u(r, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\zeta) P_r(\theta - \varphi) d\varphi,$$

де

$$P(r, \theta - \varphi) = \frac{1 - |z|^2}{|\zeta - z|^2} = \frac{1 - r^2}{1 - 2r \cos(\theta - \varphi) + r^2}$$

- так зване ядро Пуассона.

Тоді

1) функція $u(z)$ гармонійна всередині круга $K: |z| < 1$;

2) $u(z) \rightarrow \psi(e^{i\varphi})$ рівномірно по $\varphi \in [0, 2\pi]$ при $z \rightarrow e^{i\varphi}$.

Ядро Пуассона можна зобразити рядом:

$$\begin{aligned} P_r(\theta - \varphi) &= \operatorname{Re} \frac{\zeta + z}{\zeta - z} = \operatorname{Re} \left(\zeta / (\zeta - z) + z / (\zeta - z) \right) = \operatorname{Re} \left(1 / (1 - (z/\zeta)) + (z/\zeta) \cdot (1 / (1 - (z/\zeta))) \right) = \\ &= \operatorname{Re} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (z/\zeta)^n + \sum_{n=1}^{\infty} (z/\zeta)^n \right) = \operatorname{Re} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r^n e^{in(\theta - \varphi)} \right) = \\ &= 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r^n \cos n(\theta - \varphi), \end{aligned} \tag{1}$$

який збігається рівномірно при фіксованому $z = e^{i\theta}$ та змінному $\zeta = e^{i\varphi}$, $\varphi \in [0, 2\pi]$. Отже цей ряд, помножений на функцію $\psi(\varphi)$, можна проінтегрувати (з урахуванням тотожності $\cos n(\theta - \varphi) = \cos n\theta \cos n\varphi + \sin n\theta \sin n\varphi$):

$$\begin{aligned} u(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) P_r(\theta - \varphi) d\varphi = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r^n \cos n(\theta - \varphi)\right) d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) d\varphi + \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} r^n \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) \cos n\varphi d\varphi \cdot \cos n\theta + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) \sin n\varphi d\varphi \cdot \sin n\theta\right) = \\ &= \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta), \end{aligned} \quad (2)$$

де коефіцієнти

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) \cos n\varphi d\varphi, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\varphi) \sin n\varphi d\varphi, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

називаються коефіцієнтами Фур'є функції $\psi(\varphi)$.

Ясно, що одержане розвинення (2) гармонійної в одиничному крузі K функції $u(z)$ збігається абсолютно при $|z| = r < 1$ та рівномірно¹ при $|z| \leq r_0 < 1$.

Формально утворений за коефіцієнтами a_n та b_n ряд

$$\frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (4)$$

називається рядом Фур'є 2π -періодичної функції $\psi(\varphi)$.

Цікаво, що його можна одержати із ряду (2) формальною заміною r на 1, а θ на φ . Оскільки сума ряду (2) є функція $u(z)$, причому $u(re^{i\varphi}) \rightarrow \psi(e^{i\varphi}) = \psi(\varphi)$ рівномірно при $r \rightarrow 1$, Пуассон вважав², що звідси випливає збіжність ряду Фур'є неперервної функції до неї самої. Але це не так і збіжність ряду Фур'є із теореми 1 не випливає --- існують приклади неперервних функцій, ряди Фур'є яких розбіжні.

Теорема Пуассона дає метод відновлення неперервної 2π -періодичної функції $\psi(\varphi)$ за її рядом Фур'є (навіть в точках розбіжності ряду!). Саме, за рядом Фур'є (4) утворюють ряд

$$\frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) =: u(r, \varphi) \quad (r < 1),$$

який називається *абелевим середнім ряду Фур'є функції $\psi(\varphi)$* . Оскільки "абелеве середнє ряду Фур'є функції ψ " та "інтеграл Пуассона від функції ψ " - це насправді одне і те ж, то за теоремою 1 виходить³:

¹Хоча б тому, що мажорується збіжним числовим рядом

$$M \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r_0^n\right) \quad (|a_n| \leq \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} |\psi(\varphi)| d\varphi \leq 2M, |b_n| \leq 2M, M = \max |\psi(\varphi)|).$$

²П. Кусис, Введение в теорию пространств H^p . - М.: Мир, 1984, с.17.

³Символ \rightrightarrows - це позначення для "рівномірно збігається".

$$u(r, \varphi) \Rightarrow \psi(\varphi) \quad \text{при} \quad r \rightarrow 1, \quad \varphi \in [0, 2\pi].$$

Описаний метод називається методом Абе́ля-Пуассона підсумовування ряду Фур'є.

Частинні суми ряду Фур'є та абелевого середнього мають вигляд:

$$T(\varphi) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cos k\varphi + \beta_k \sin k\varphi),$$

де $\alpha_0, \alpha_k, \beta_k$ --- дійсні числа. Цей вираз називається *тригонометричним поліномом порядку n* (якщо $|\alpha_n| + |\beta_n| \neq 0$).

Перша теорема Вейерштрасса. *Якщо $\psi(\varphi)$ - 2π -періодична та неперервна функція, то для будь-якого $\varepsilon > 0$ існує тригонометричний поліном $T(\varphi)$ такий, що*

$$|\psi(\varphi) - T(\varphi)| < \varepsilon \quad \text{для всіх } \varphi.$$

Д о в е д е н н я. Нам зручно вважати, що дана функція визначена на одиничному колі $\gamma: |\zeta| = 1$. Тоді за теоремою 1 існує гармонічна в крузі $K: |z| < 1$ функція $u(z)$ з властивістю:

$$u(z) = u(r, \theta) \Rightarrow \psi(\varphi) \quad \text{при} \quad r \rightarrow 1, \quad \varphi \in [0, 2\pi].$$

При цьому для нашої мети можна вважати $\theta = \varphi$, що означає при $r \rightarrow 1$ прямування точки $z = re^{i\varphi}$ до точки $e^{i\varphi}$ на колі γ по радіусу⁴ з кінцем в точці $e^{i\varphi}$.

Візьмемо яке-небудь $\varepsilon > 0$ та зафіксуємо число r_0 настільки близьке до 1, щоб було:

$$|u(r_0, \varphi) - \psi(\varphi)| < \frac{\varepsilon}{2}, \quad \varphi \in [0, 2\pi].$$

Оскільки розвинення

$$u(r_0, \varphi) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_1^{\infty} r_0^n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi)$$

рівномірнозбіжне на відрізку $[0, 2\pi]$, то існує номер n такий, що для його частинної суми

$$T(\varphi) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_1^n r_0^k (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi)$$

буде

$$|u(r_0, \varphi) - T(\varphi)| < \frac{\varepsilon}{2}, \quad \varphi \in [0, 2\pi].$$

У підсумку з урахуванням двох останніх нерівностей виявляється:

$$\begin{aligned} |\psi(\varphi) - T(\varphi)| &= |\psi(\varphi) - u(r_0, \varphi) + u(r_0, \varphi) - T(\varphi)| \leq \\ &\leq |\psi(\varphi) - u(r_0, \varphi)| + |u(r_0, \varphi) - T(\varphi)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon, \end{aligned}$$

що і доводить теорему.

Наслідок. Якщо в умовах теореми Вейерштрасса функція $\psi(\varphi)$ парна, то в твердженні теореми поліном $T(\varphi)$ містить тільки косинуси кратних дуг:

$$T(\varphi) = \alpha_0 + \sum_{r=1}^n \alpha_r \cos r\varphi.$$

Це становиться очевидним, якщо врахувати парність даної функції при обчисленні коефіцієнта b_n ряду (2):

⁴точка z в теоремі 1 може прямувати до точки $e^{i\varphi}$ на колі γ будь-яким недотичним шляхом.

періодичну неперервну функцію $\psi(\varphi) = F(\cos \varphi)$. Для неї існує (за наслідком першої теореми Вейерштрасса) парний тригонометричний поліном $P(\cos \varphi)$ такий, що

$$|\psi(\varphi) - P(\cos \varphi)| < \varepsilon.$$

Повертаючись до заміни $x = \cos \varphi$, одержуємо:

$$|F(x) - P(x)| < \varepsilon, \quad x \in [-1, 1],$$

зокрема,

$$|f(x) - P(x)| < \varepsilon, \quad x \in [0, 1],$$

оскільки $F(x) = f(x)$ на відрізку $[0, 1]$.

Теорема доведена.

Література

1. Дьедонне Ж. Основы современного анализа. – М.: Мир, 1964, с. 430.
2. Бари Н. К. Тригонометрические ряды. – М.: Физматгиз, 1961, с. 936.
3. Натансон И.П. Конструктивная теория функций. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949, с. 688.
4. Голузин Г.М. Геометрическая теория функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1966, с. 628.

References

1. D'edonne Zh. Osnovy sovremennogo analiza. – M.: Mir, 1964, s. 430.
2. Bari N. K. Trigonometricheskie rjady. – M.: Fizmatgiz, 1961, s. 936.
3. Natanson I.P. Konstruktivnaja teorija funkcij. – M.-L.: Gostehizdat, 1949, s. 688.
4. Goluzin G.M. Geometricheskaja teorija funkcij kompleksnogo peremennogo. – M.: Nauka, 1966, s. 628.

Єрмаков А.І. – к. ф.-м. н., доц. кафедри «Математичний аналіз» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Голубничій П.І., д. ф.-м. наук, проф., зав. каф. «Фізики» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

УДК 530.1

М.И. Львова, В.С. Щелоков

г. Луганск

ТРЕХВРЕМЕННЫЕ ФУНКЦИИ ГРИНА НОРМАЛЬНЫХ БОЗЕ-СИСТЕМ

В рамках вариационной теории дано полное исследование низкочастотной асимптотики многовременных функций Грина нормальных бозе-систем. Ист. 1.

Ключевые слова: бозе-система, функция Грина, сокращенное описание, низкочастотная асимптотика.

1. Введение. В этой работе будет проведено исследование низкочастотной асимптотики трехвременных функций Грина нормальных бозе-систем в гидродинамическом пределе на основе вариационного подхода, сформулированного в [1].

Трехвременные запаздывающие функции Грина квазилокальных операторов $\xi(x)$, $\xi_1(x)$, $\xi_2(x)$ в соответствии с (В.9) из [1], даются формулой

$$G_{\xi_1 \xi_2}^{(+)}(x, t; x_1, t_1; 0, 0) = \left[\frac{\delta^2 Sp \rho_F(t) \xi(x)}{\delta F_1(x_1, t_1) \delta F_2(x_2, t_2)} \right]_{t_1=t_2=0}^{t_1=t_2=0}, \quad (1)$$

где СО $\rho_F(t)$ удовлетворяет уравнению (В.2) из [1]. Переходя в (1) от СО $\rho_F(t)$ к СО (I.1.1) из [1] и вычисляя с помощью представления (I.1.8) из [1] соответствующие вариационные производные, найдем для фурье-компонент

$$\begin{aligned} G_{\xi_1 \xi_2}^{(+)}(k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0) &= h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(-k_1, \omega_1) h_{\zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) Sp \sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, k + k_1) \xi(0) + \\ &+ h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) Sp \sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k, k + k_1, \omega + \omega_1) \xi(0) + \\ &+ h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) Sp \sigma_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k; -k_1, -\omega_1) \xi(0) + \\ &+ h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) Sp \sigma_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k) \xi(0) + Sp \rho^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) \xi(0) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k, \omega)$, $\sigma_{\zeta_\alpha}(k)$ фурье-компоненты величин $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(x, t)$, $\sigma_{\zeta_\alpha}(x)$, определяемых формулами (I.2.4) из [1], $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $\sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, k_1)$, $\sigma_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $\rho^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$ фурье-образы следующих функций

$$\begin{aligned} h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(x - x_1, t - t_1; x_1, t_1) &= \left[\delta^2 \zeta_{F\alpha}(x, t) / \delta F_1(x_1, t_1) \delta F_2(x_2, t_2) \right]_0^{x_2=t_2=0}; \\ \sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(x - x_1, x_1) &= \left[\delta^2 \rho_F(x, \zeta_F(\tilde{x}, t); t) / \delta \zeta_{F\alpha}(x_1, t_1) \delta \zeta_{F\beta}(x_2, t_2) \right]_0^{x_2=t_2=0}; \\ \sigma_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(x - x'; x' - x_1, t - t_1) &= \left[\partial(\delta \rho_F(x, \zeta_F(\tilde{x}, t); t) / \delta \zeta_{F\alpha}(x', t) / \delta F_1(x_1, t_1)) \right]_0; \\ \rho^{(\xi_1 \xi_2)}(x - x_1; t - t_1; x_1, t_1) &= \left[\partial^2 \rho_F(x, \zeta_F(\tilde{x}, t); t) / \delta F_1(x_1, t_1) \delta F_2(x_2, t_2) \right]_0^{x_2=t_2=0}. \end{aligned} \quad (3)$$

2. Формулировка проблемы. Для последующих построений найдем уравнения для определения величин $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $\sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, k_1)$, $\sigma_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k; k_1, \omega_1)$, $\rho^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$. Заметим здесь, что в [1] на основе линейной теории, были получены уравнения (I.2.8), (I.2.10), (I.2.11) для функций $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k, \omega)$, $\sigma_{\zeta_\alpha}(k_1)$, $\rho^{(\xi_1)}(k, \omega)$. Выпишем уравнение для нахождения функций $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$. Варьируя уравнение (I.1.5) из [1] в соответствии с определением (3) величин $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(x, t; x_1, t_1)$ и, переходя к фурье-компонентам, получим

$$\begin{aligned} \omega h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) - k_n T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta}^{(\xi_1 \xi_2)}(k) h_{\zeta_\beta}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) = \\ = K_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь «источники» $K_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)$ даются равенством

$$\begin{aligned} K_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= k_n T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta; \zeta_\gamma}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, k + k_1) h_{\zeta_\beta}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) \cdot \\ &\cdot h_{\zeta_\gamma}^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) + k_n T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k; k + k_1, \omega + \omega_1) h_{\zeta_\beta}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) + \\ &+ k_n T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta}^{(\xi_1)}(k; -k_1, -\omega_1) h_{\zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) + k_n T_{\zeta_{an}}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) + \\ &+ i Q_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1). \end{aligned} \quad (5)$$

В формуле (I.4.5) введены обозначения

$$\begin{aligned} T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta}^{(\xi_1)}(k; k_1, \omega_1) &= Sp \sigma_{\zeta_\beta}^{(\xi_1)}(k; k_1, \omega_1) \zeta_{an}(0), \\ T_{\zeta_{an}; \zeta_\beta; \zeta_\gamma}^{(\xi_1 \xi_2)}(k, k_1) &= Sp \sigma_{\zeta_\beta; \zeta_\gamma}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, k_1) \zeta_{an}(0), \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_{\zeta_{an}}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1) = Sp \rho^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1) \zeta_{an}(0).$$

Величины $Q_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$ определяются соотношением

$$\begin{aligned} Q_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= ih_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_1)}(-k_1; -\omega_1) Sp \sigma_{\zeta_{\beta}}(-k_1) [\xi(-k - k_1), \zeta_{\alpha}(0)] + \\ &+ ih_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_2)}(k + k_1; \omega + \omega_1) Sp \sigma_{\zeta_{\beta}}(k + k_1) [\xi(k_1), \zeta_{\alpha}(0)] + \\ &+ i Sp \rho^{(\xi_1)}(-k_1; -\omega_1) [\xi(-k - k_1), \zeta_{\alpha}(0)] + i Sp \rho^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) [\xi(k_1), \zeta_{\alpha}(0)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Найдем уравнение для определения операторов $\sigma_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k_1)$. С этой целью проварьируем уравнение (I.1.10) из [1], учитывая определение (3) величин $\sigma_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x, x_1)$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x - x_1, x_1) &= w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x - x_1, x_1) + \int_{-\infty}^0 d\tau e^{\eta\tau} e^{iH\tau} \left\{ i \left[w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x - x_1, x_1), H \right] + \right. \\ &+ \int d^3 x' \sigma_{\zeta_{\gamma}; \zeta_{\alpha}}(x - x', x' - x_1) \left(\partial T_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x') / \partial x_i' \right) + \int d^3 x' \sigma_{\zeta_{\gamma}; \zeta_{\beta}}(x - x', x') \cdot \\ &\cdot \left. \left(\partial T_{\zeta_{\gamma L}; \zeta_{\alpha}}(x' - x_1) / \partial x_i' \right) + \int d^3 x' \sigma_{\zeta_{\gamma}; \zeta_{\alpha}}(x - x') \left(\partial T_{\zeta_{\gamma L}; \zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x' - x_1, x_1) / \partial x_i' \right) \right\} e^{-iH\tau}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x - x_1, x_1)$ определяется соотношением

$$w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(x - x_1, x_1) = \left[\delta^2 w_F(x, \zeta_F(\tilde{x}, t)) / \delta \zeta_{F\alpha}(x_1, t) \delta \zeta_{F\beta}(x_2, t) \right]_{x_2=0}^{x_2=0}. \quad (9)$$

В терминах фурье-компонент уравнение (8) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \sigma_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1) &= w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1) + \int_{-\infty}^0 d\tau e^{\eta\tau} e^{iH\tau} \left\{ i \left[w_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1), H \right] + \right. \\ &+ i(k + k_1)_{\ell} \sigma_{\zeta_{\gamma}; \zeta_{\alpha}}(k, -k_1) T_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, +k_1) + ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\gamma}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1) \cdot \\ &\cdot T_{\zeta_{\gamma L}; \zeta_{\beta}}(k_1) + ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\gamma}}(k) T_{\zeta_{\gamma L}; \zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1) \left. \right\} e^{-iH\tau}. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя (I.1.10) из [1], (3) легко найти уравнение, которому удовлетворяют операторы $\sigma_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1)}(k; k_1, \omega_1)$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1)}(-k; k + k_1, \omega_1) &= \int_{-\infty}^0 d\tau e^{\eta\tau} e^{iH\tau} \left\{ i \left[\sigma_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1)}(k + k_1), \xi(k_1) \right] - ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\alpha}; \zeta_{\beta}}(k, k + k_1) \cdot \right. \\ &\cdot T_{\zeta_{\beta L}}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) - ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\beta}}(k) T_{\zeta_{\beta L}; \zeta_{\alpha}}^{(\xi_1)}(-k; k + k_1, \omega_1) - i(k + k_1)_{\ell} \cdot \\ &\cdot \left. \sigma_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_1)}(-k_1, k + k_1, \omega_1) T_{\zeta_{\beta L}; \zeta_{\alpha}}(k_1) + i\omega_1 \sigma_{\zeta_{\alpha}}^{(\xi_1)}(-k, k + k_1, \omega_1) \right\} e^{-iH\tau}. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее дважды варьируя (I.1.10) из [1] по внешним полям $F_k(x, t)$, $k = 1, 2$ получим на основании (3) последующего перехода к фурье компонентам уравнение для $\rho^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$:

$$\begin{aligned} \rho^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= \int_{-\infty}^0 d\tau e^{\eta\tau} e^{iH\tau} \left\{ i \left[\rho^{(\xi_1)}(-k_1, \omega_1), \xi(-k - k_1) \right] + \right. \\ &+ i \left[\rho^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1), \xi(k_1) \right] + ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\beta}}(k) T_{\zeta_{\beta L}}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) - \\ &- ik_{1\ell} \sigma_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_2)}(k + k_1; -k_1, \omega + \omega_1) T_{\zeta_{\beta L}}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) + i(k + k_1)_{\ell} \sigma_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_1)}(-k_1; k + k_1, -\omega_1) \cdot \\ &\cdot \left. T_{\zeta_{\beta L}}^{(\xi_2)}(k + k_1, \omega + \omega_1) - i\omega \rho_{\zeta_{\beta}}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) - \right. \end{aligned}$$

$$-\sigma_{\zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k+k_1; -k_1, \omega+\omega_1) Q_{\zeta_\beta}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) - \sigma_{\zeta_\beta}^{(\xi_1)}(-k_1; k+k_1, -\omega_1) \cdot \\ \cdot Q_{\zeta_\beta}^{(\xi_2)}(k+k_1, \omega+\omega_1) - \sigma_{\zeta_\beta}(k) q_{\zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1) \} e^{-iH\tau}. \quad (12)$$

Здесь $q_{\zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$ определяются формулой

$$q_{\zeta_\beta}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1) = iSp\rho^{(\xi_2)}(k+k_1, \omega+\omega_1) [\xi(k_1), \zeta_\beta(0)] + \\ + iSp\rho^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) [\xi(-k-k_1), \zeta_\beta(0)]. \quad (13)$$

Соотношение (4), (10)-(12) вместе с ранее полученными в [1] (I.2.8), (I.2.10), (I.2.11) представляют собой замкнутую систему уравнений для величин, определяющих трехвременную функцию Грина (2).

3. Результаты. Дадим теперь общий анализ полюсов гидродинамической асимптотики трехвременных функций Грина (2) как в приближении идеальной жидкости, так и в приближении вязкой жидкости. Легко видеть, что полюсная часть функций Грина (2) определяется функциями $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k, \omega)$ и $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, удовлетворяющим системе уравнений (I.2.8) из [1] и (4). В [1] было проведено исследование уравнения (I.2.8) для функций $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1)}(k, \omega)$. Здесь мы остановимся на исследовании уравнения (4), которое позволяет учесть, в отличие от (I.2.8) из [1], нелинейные взаимодействия волн. Действительно, легко видеть, используя формальное решение уравнения (4), что гидродинамическая асимптотика трехвременных функций Грина (2) будет иметь следующую структуру

$$G_{\xi_1, \xi_2}^{(+)}(k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0) = G^{reg}(k, \omega; k_1, \omega_1) + G^{sing}(k, \omega; k_1, \omega_1), \quad (14)$$

где полюсная часть асимптотики $G^{sing}(k, \omega; k_1, \omega_1)$ дается соотношением

$$G^{sing}(k, \omega; k_1, \omega_1) = A_{\zeta_{\beta 1}; \zeta_{\alpha 1}} B_{\zeta_{\beta 2}; \zeta_{\alpha 2}} C_{\zeta_{\beta 3}; \zeta_{\alpha 3}} \cdot \\ \cdot [-\omega_1 - \hat{T}(-k_1)]_{\zeta_{\alpha 1}; \zeta_{\beta 1}}^{-1} [\omega + \omega_1 - \hat{T}(k+k_1)]_{\zeta_{\alpha 2}; \zeta_{\beta 2}}^{-1} [\omega - \hat{T}(k)]_{\zeta_{\alpha 3}; \zeta_{\beta 3}}^{-1}; \quad (15)$$

(регулярную часть асимптотики $G^{reg}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, а также величины $A_{\zeta_{\beta 1}; \zeta_{\alpha 1}}$, $B_{\zeta_{\beta 2}; \zeta_{\alpha 2}}$, $C_{\zeta_{\beta 3}; \zeta_{\alpha 3}}$ мы здесь явно не выписываем).

Равенства (4) представляют собой систему уравнений для неизвестных функций $h_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1) = \{h_\varepsilon^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1), h_{\pi_n}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1), h_\sigma^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)\}$. Векторную часть $h_{\pi_n}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$ можно разложить по тройке некопланарных векторов $\{k, k_1, r = [k, k_1]\}$:

$$h_{\pi_n}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1) = \frac{k_n}{k} h_1(k, \omega; k_1, \omega_1) + \frac{k_1}{k} h_2(k, \omega; k_1, \omega_1) + \frac{r_n}{r} h_3(k, \omega; k_1, \omega_1). \quad (16)$$

Таким образом, от системы (4) можно перейти, с учетом (16), к системе уравнений для пяти с-числовых функций $h_\varepsilon^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_1^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_2^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_3^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_\sigma^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k_1, \omega_1)$:

$$\left\{ \omega - k_n T_{q_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \varepsilon}^{-1} \right\} h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k_i}{k} T_{q_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_1(k, \omega; k', \omega') - \\ - \frac{k_n k_i'}{k'} T_{q_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_2(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n r_i}{r} T_{q_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_3(k, \omega; k', \omega') - \\ - k_n T_{q_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \sigma}^{-1} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\varepsilon(k, \omega; k', \omega');$$

$$\begin{aligned}
& -k_n T_{\pi_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \varepsilon}^{-1} h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \left\{ \omega - k_n T_{\pi_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \sigma}^{-1} \right\} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n k_i}{k} T_{\pi_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_1(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k'_i}{k'} T_{\pi_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_2(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n r_i}{r} T_{\pi_n; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_3(k, \omega; k', \omega') = K_\sigma(k, \omega; k', \omega') \\
& \quad \left\{ \omega - \frac{k_n k_m k_i}{k^2} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} \right\} h_1(k, \omega; k', \omega') + \\
& + \left\{ \omega \cos \phi - \frac{k_n k_m k'_i}{k k'} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} \right\} h_2(k, \omega; k', \omega') + \frac{k_n k_m r}{k r} \cdot \\
& \cdot T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_3(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k_m}{k} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \varepsilon}^{-1} h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n k_m}{k} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \sigma}^{-1} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_1(k, \omega; k', \omega') ; \\
& \quad \left\{ \omega - \frac{k_n k'_m k'_i}{k'^2} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} \right\} h_2(k, \omega; k', \omega') + \\
& + \left\{ \omega \cos \phi - \frac{k_n k'_m k_i}{k' k} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} \right\} h_1(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k'_m}{k'} \cdot \\
& \cdot T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \varepsilon}^{-1} h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k'_m}{k'} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \sigma}^{-1} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n k'_m r_i}{k' r} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_3(k, \omega; k', \omega') = K_2(k, \omega; k', \omega') ; \\
& \left\{ \omega - \frac{k_n k_m r_i}{k^2} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} \right\} h_3(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n r_m}{r} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \varepsilon}^{-1} h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n k'_i r_m}{k r} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_1(k, \omega; k', \omega') - \frac{k_n k'_i r_m}{k' r} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \pi_i}^{-1} h_2(k, \omega; k', \omega') - \\
& - \frac{k_n r_m}{r} T_{t_{mn}; \psi_\gamma}(k) \Lambda_{\psi_\gamma; \sigma}^{-1} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_3(k, \omega; k', \omega') . \tag{17}
\end{aligned}$$

Здесь введены следующие обозначения

$$\begin{aligned}
& k' = k + k_1, \quad \omega' = \omega + \omega_1, \quad \phi = \left(\overset{\wedge}{k, k'} \right), \\
& K_1 = \left(\frac{k_n}{k} \right) K_{\pi_n}, \quad K_2 = \left(\frac{k'_n}{k'} \right) K_{\pi_n}, \quad K_3 = \left(\frac{r_n}{r} \right) K_{\pi_n} . \tag{18}
\end{aligned}$$

Рассмотрим решение системы (17) в приближении идеальной жидкости. Используя соотношения (I.2.21) из [1], преобразуем систему (17) к виду

$$\begin{aligned}
& \omega h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - k \frac{P + \varepsilon}{\sigma} h_1(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi \cdot ; \\
& \quad \cdot \frac{P + \varepsilon}{\sigma} h_2(k, \omega; k', \omega') = K_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') ; \\
& -k(\partial p / \partial \varepsilon)_\sigma h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \omega h_1(k, \omega; k', \omega') + \\
& + \omega \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') - k(\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_1(k, \omega; k', \omega') ; \\
& -k \cos \phi (\partial p / \partial \sigma)_\sigma h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \omega \cos \phi h_1(k, \omega; k', \omega') + \\
& + \omega h_2(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi (\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_2(k, \omega; k', \omega') ; \\
& \quad \omega h_3(k, \omega; k', \omega') = K_3(k, \omega; k', \omega') ; \tag{19} \\
& -k h_1(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') + \omega h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\sigma(k, \omega; k', \omega') .
\end{aligned}$$

Детерминант этой системы равен

$$\Delta(k, \omega; k', \omega') = \sin^2 \phi \cdot \delta(k, \omega), \quad \delta(k, \omega) = \omega^3 (\omega^2 - k^2 s^2), \quad (20)$$

где s - скорость звука (I.2.25) из [1].

Используя соотношение (18) для источников $K_{\xi_a}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k', \omega')$, а также решение системы (I.2.23) из [1], можно на основании (19) найти явные выражения для функций $h_\varepsilon(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_1(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_2(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_3(k, \omega; k_1, \omega_1)$, $h_\sigma(k, \omega; k_1, \omega_1)$, с помощью которых определяется гидродинамическая асимптотика трехвременных функций Грина (2) в приближении идеальной жидкости.

Заметим здесь, что полюсная структура функций Грина (2) вида (15) формируется на основе решения основной системы (19), в которой «источники» $K_{\xi_a}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k', \omega')$, содержат полюсные слагаемые типа $k_n T_{\xi_a; \xi_\beta; \xi_\gamma}^{(\xi_1)}(k, k+k_1) h_{\xi_\beta}^{(\xi_1)}(-k_1, -\omega_1) h_{\xi_\gamma}^{(\xi_2)}(k+k_1, \omega+\omega_1)$, ответственные за нелинейные взаимодействия волн.

Выпишем теперь систему уравнений (17) с учетом диссипативных процессов. На основании (I.2.26) из [1] преобразуем (17) к виду

$$\begin{aligned} & \left(\omega + ik^2 \frac{\aleph}{c_v} \right) h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - k \frac{p+\varepsilon}{\sigma} h_1(k, \omega; k', \omega') - \\ & - k \cos \phi \frac{p+\varepsilon}{\sigma} h_2(k, \omega; k', \omega') + ik^2 \frac{\aleph}{\alpha} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\varepsilon(k, \omega; k', \omega'); \\ & - k (\partial p / \partial \varepsilon)_\sigma h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] h_1(k, \omega; k', \omega') + \\ & + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') - k (\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = \\ & = K_1(k, \omega; k', \omega'); \\ & - k (\partial p / \partial \varepsilon)_\sigma \cos \phi h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos \phi h_1(k, \omega; k', \omega') + \\ & + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos^2 \phi h_2(k, \omega; k', \omega') - k (\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon \cos \phi h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = \\ & = K_2(k, \omega; k', \omega'); \\ & \left(\omega + i\eta k^2 \frac{1}{\sigma} \right) h_3(k, \omega; k', \omega') = K_3(k, \omega; k', \omega'); \\ & - kh_1(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') + \omega h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\sigma(k, \omega; k', \omega'). \end{aligned} \quad (21)$$

Выпишем детерминант этой системы

$$\Delta(k, \omega; k', \omega') = -\sin^2 \phi \left(\omega + i\eta k^2 \frac{1}{\sigma} \right) \Delta(k, \omega), \quad (22)$$

$$\Delta(k, \omega) = - \left\{ \omega^3 - \omega \left[s^2 - i \frac{\aleph \omega}{c_v} - i \frac{\omega}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] k^2 - \aleph \left[\omega \frac{1}{\sigma c_v} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) - i \frac{s^2}{c_p} \right] \right\}.$$

Уравнение $\Delta(k, \omega; k', \omega') = 0$ имеет два решения

$$k = \frac{\omega}{s} + i\gamma(\omega), \quad k = \left(\frac{\sigma}{2\eta} \right)^{1/2} \omega^{1/2} + i\chi(\omega), \quad (23)$$

где $\gamma(\omega)$ - декремент затухания звуковых волн (I.2.30) из [1],

$\chi(\omega)$ - декремент затухания вязких волн,

$$\chi(\omega) = \left(\frac{\sigma\omega}{2\eta} \right)^{1/2}.$$

Здесь мы не приводим явных выражений для решений основной системы (21). Заметим однако, что они определяются не только детерминантом (22), но и нелинейными слагаемыми, содержащимися в источниках $K_{\zeta_\alpha}^{(\xi_1, \xi_2)}(k, \omega; k', \omega')$ (5).

В качестве иллюстрации разработанной схемы вычислим гидродинамическую асимптотику трехвременной функции Грина $G_{\sigma\sigma\sigma}^{(+)} = (k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0)$. Полагая в формуле (2) $\xi = \sigma$, $\xi_1 = \sigma$, $\xi_2 = \sigma$, получим

$$\begin{aligned} G_{\sigma\sigma\sigma}^{(+)} &= (k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0) = h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(-k_1, -\omega_1)h_{\zeta_\beta}^{(\sigma)}(k+k_1, \omega+\omega_1) \cdot \\ &Sp\sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}(k; k+k_1)\sigma(0) + h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1)Sp\sigma_{\zeta_\alpha}(k)\sigma(0) + \\ &+ h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(-k_1, -\omega_1)Sp\sigma_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(k; k+k_1, \omega+\omega_1)\sigma(0) + h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(k+k_1, \omega+\omega_1) \cdot \\ &\cdot Sp\sigma_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(k; -k_1, -\omega_1)\sigma(0) + Sp\sigma^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1)\sigma(0). \end{aligned} \quad (25)$$

Учитывая (3), легко видеть, что

$$\begin{aligned} Sp\sigma_{\zeta_\alpha; \zeta_\beta}(k; k+k_1)\sigma(0) &= 0, \quad \cdot Sp\sigma_{\zeta_\alpha}^{(\sigma)}(k+k_1; -k_1, -\omega_1)\sigma(0) = 0, \\ Sp\rho^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1)\sigma(0) &= 0, \quad Sp\sigma_{\zeta_\alpha}(k)\sigma(0) = \delta_{\zeta_\alpha; \sigma} \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, функция Грина (25) на основании (26) определяется соотношением

$$G_{\sigma\sigma\sigma}^{(+)} = (k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0) = h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1), \quad (27)$$

где $h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1)$ - фурье компонента функции $h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma\sigma)}(x-x_1, t-t_1; x_1, t_1)$, определяемой равенством (3).

Найдем функцию Грина (27) в приближении вязкой жидкости. Функция $h_{\zeta_\alpha}^{(\sigma\sigma)}(k, \omega; k+k_1, \omega+\omega_1)$ является решением основной системы (21), которая в данном случае имеет вид:

$$\begin{aligned} &\left(\omega + ik^2 \frac{\aleph}{c_v} \right) h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') - k \frac{P+\varepsilon}{\sigma} h_1(k, \omega; k', \omega') - \\ &- k \cos \phi \frac{P+\varepsilon}{\sigma} h_2(k, \omega; k', \omega') + ik^2 \frac{\aleph}{\alpha} h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\varepsilon(k, \omega; k', \omega'); \\ &- k(\partial p / \partial \varepsilon)_\sigma h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] h_1(k, \omega; k', \omega') + \\ &+ \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') - k(\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = \\ &= K_1(k, \omega; k', \omega'); \\ &- k(\partial p / \partial \varepsilon)_\sigma \cos \phi h_\varepsilon(k, \omega; k', \omega') + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos \phi h_1(k, \omega; k', \omega') + \\ &+ \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] \cos^2 \phi h_2(k, \omega; k', \omega') - k(\partial p / \partial \sigma)_\varepsilon \cos \phi h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = \\ &= K_2(k, \omega; k', \omega'); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\omega + i\eta k^2 \frac{1}{\sigma} \right) h_3(k, \omega; k', \omega') = K_3(k, \omega; k', \omega'); \\ & -kh_1(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') + \omega h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = K_\sigma(k, \omega; k', \omega'). \\ & \left(\omega + i\eta k^2 \frac{1}{\sigma} \right) h_3(k, \omega; k', \omega') = 0; \\ & -kh_1(k, \omega; k', \omega') - k \cos \phi h_2(k, \omega; k', \omega') + \omega h_\sigma(k, \omega; k', \omega') = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Выпишем явные выражения для источников $K_\varepsilon(k, \omega; k', \omega')$, $K_1(k, \omega; k', \omega')$, $K_2(k, \omega; k', \omega')$, входящих в (28), в интересующем нас приближении. На основании (5), (6), (26) находим

$$\begin{aligned} K_\varepsilon(k, \omega; k_1, \omega_1) &= \frac{K_\varepsilon^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)}{\Delta(-k_1, -\omega_1)\Delta(k + k_1, \omega + \omega_1)}, \\ K_\varepsilon^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= \frac{\partial w}{\partial \sigma} \left[\frac{(k, k + k_1)}{|k + k_1|} h^*(k + k_1, \omega + \omega_1) h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) - \right. \\ & - \frac{(k, k_1)}{k_1} h^*(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) \left. \right] + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \left[\frac{(k, k_1)}{k_1} h^*(-k_1, -\omega_1) h_\varepsilon^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + \right. \\ & \left. + \frac{(k, k + k_1)}{|k + k_1|} h^*(k + k_1, \omega + \omega_1) h^*(-k_1, -\omega_1) \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} h^*(-k, -\omega) &= \Delta(k, \omega)h(k, \omega), \\ h_\varepsilon^*(k, \omega) &= \Delta(k, \omega)h_\varepsilon(k, \omega), \\ h_\sigma^*(k, \omega) &= \Delta(k, \omega)h_\sigma(k, \omega) \end{aligned} \quad (30)$$

а величина $\Delta(k, \omega)$ дается равенством (22). Для $K_1(k, \omega; k', \omega')$ будем иметь

$$\begin{aligned} K_1(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= \frac{K_1^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)}{\Delta(-k_1, -\omega_1)\Delta(k + k_1, \omega + \omega_1)}, \\ K_1^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= \frac{(k, k_1)}{k} h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1)\Delta(-k_1, -\omega_1) - \\ & - \frac{(k + k_1, k)}{k} h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1)\Delta(k + k_1, \omega + \omega_1) + k \left(\partial^2 p / \partial \sigma^2 \right) h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) \cdot \\ & \cdot h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + k \left(\partial^2 p / \partial \varepsilon^2 \right) h_\varepsilon^*(-k_1, -\omega_1) h_\varepsilon^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + \\ & + k \frac{\partial^2 p}{\partial \varepsilon \partial \sigma} \left[h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) h_\varepsilon^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + h_\varepsilon^*(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) \right] - \\ & - \frac{2}{\sigma} \frac{(k, k + k_1)(k, k_1)}{kk_1|k + k_1|} h^*(-k_1, -\omega_1) h^*(k + k_1, \omega + \omega_1). \end{aligned} \quad (31)$$

И, наконец, для $K_2(k, \omega; k', \omega')$ получим формулу:

$$\begin{aligned} K_2(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= \frac{K_2^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)}{\Delta(-k_1, -\omega_1)\Delta(k + k_1, \omega + \omega_1)}, \\ K_2^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) &= k_1 \Delta(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) - \frac{(k + k_1, k)}{k_1} h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) \\ & \cdot \Delta(k + k_1, \omega + \omega_1) + \frac{(k, k_1)}{k_1} \frac{\partial^2 p}{\partial \sigma^2} h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{(k, k_1)}{k_1} \frac{\partial^2 p}{\partial \varepsilon^2} h_\varepsilon^*(-k_1, -\omega_1) h_\varepsilon^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + \frac{(k, k_1)}{k_1} \frac{\partial^2 p}{\partial \varepsilon \partial \sigma} \\
& \cdot \left[h_\sigma^*(-k_1, -\omega_1) h_\varepsilon^*(k + k_1, \omega + \omega_1) + h_\varepsilon^*(-k_1, -\omega_1) h_\sigma^*(k + k_1, \omega + \omega_1) \right] - \\
& - \frac{1}{\sigma} \left[\frac{(k, k + k_1)}{|k + k_1|} + \frac{(k, k + k_1)(k, k_1)}{k|k + k_1|k_1} \right] h^*(-k_1, -\omega_1) h^*(k + k_1, \omega + \omega_1). \quad (32)
\end{aligned}$$

Источники $K_3(k, \omega; k', \omega')$, $K_\sigma(k, \omega; k', \omega')$ в указанном приближении равны нулю.

В формулы (29), (31), (32) входят неизвестные функции $h^*(k, \omega)$, $h_\varepsilon^*(k, \omega)$, $h_\sigma^*(k, \omega)$. Легко видеть, учитывая (30), что они удовлетворяют системе уравнений (27)

$$\begin{aligned}
& \left(\omega + ik^2 \frac{\aleph}{c_v} \right) h_\varepsilon^*(k, \omega) - k \frac{p + \varepsilon}{\sigma} h^*(k, \omega) + ik^2 \frac{\aleph}{\alpha} h_\sigma^*(k, \omega) = 0; \\
& -kh^*(k, \omega) + \omega h_\sigma^*(k, \omega) = 0; \quad (33) \\
& - \left(\frac{\partial p}{\partial \varepsilon} \right)_\sigma h_\varepsilon^*(k, \omega) + \left[\omega + ik^2 \frac{1}{\sigma} \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta \right) \right] h^*(k, \omega) - \left(\frac{\partial p}{\partial \varepsilon} \right)_\varepsilon h_\sigma^*(k, \omega) = k\sigma \Delta(k, \omega).
\end{aligned}$$

Заметим, что для системы (33), согласно (I.2.9), (I.2.20) из [1], «источники» $K_\varepsilon(k, \omega)$, $K_\sigma(k, \omega)$ и $K(k, \omega)$ определяются соотношениями

$$K_\varepsilon(k, \omega) = K_\sigma(k, \omega) = 0, \quad K(k, \omega) = k\sigma. \quad (34)$$

Выпишем решение системы (33)

$$\begin{aligned}
h_\sigma^*(k, \omega) &= k^2 \sigma \left(\omega + ik^2 \frac{\aleph}{c_v} \right), \\
h_\varepsilon^*(k, \omega) &= -k^2 \sigma \left(\omega \frac{p + \varepsilon}{\sigma} - ik^2 \frac{\aleph}{\alpha} \right), \quad (35) \\
h^*(k, \omega) &= \omega k \sigma \left(\omega + ik^2 \frac{\aleph}{c_v} \right).
\end{aligned}$$

Находя на основании (28) выражение для $h_\sigma(k, \omega; k', \omega')$ и используя (27), окончательно получим

$$\begin{aligned}
G_{\sigma\sigma\sigma}^{(+)}(k, \omega; k_1, \omega_1; 0, 0) &= -\Delta^{-1}(k, \omega) \Delta^{-1}(-k_1, -\omega_1) \Delta^{-1}(k + k_1, \omega + \omega_1) \cdot \\
& \left\{ k^2 \left(\frac{\partial p}{\partial \varepsilon} \right)_\sigma K_\varepsilon^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) + \left(k\omega + ik^3 \frac{\aleph}{c_v} \right) K_1^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1) \right\}, \quad (36)
\end{aligned}$$

где $K_\varepsilon^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)$, $K_1^*(k, \omega; k + k_1, \omega + \omega_1)$ определяются, соответственно, формулами (29), (31);

Δ - дается равенством (22).

4. Выводы. Разработанный выше математический аппарат исследования низкочастотной асимптотики многовременных функций Грина связан с изучением поведения нормальных бозе-систем. С некоторыми модификациями эта система может быть использована для вычисления низкочастотных асимптотик функций Грина бозе-систем со спонтанно-нарушенной симметрией, что составит предмет исследования авторов в следующей работе.

Л и т е р а т у р а

1. Щелоков В.С. Вариационная теория многовременных функций Грина в статистической механике: Монография. – Луганск, 1997. - 196 с.

References

1. Welokov V.S. Variacionnaja teorija mnogovremennyh funkcij Grina v stati-sticheskoj mehanike: Monografija. – Lugansk, 1997. - 196 s.

Львова М.І., Щолоков В.С.

Трьохтимчасові функції Гріна нормальних бозе-систем

У рамках варіаційної теорії дано повне дослідження низькочастотної асимптотики багатотимчасових функцій Гріна нормальних бозе-систем. Дж. 1.

Ключові слова: бозе-система, функція Гріна, скорочений опис, низькочастотна асимптотика

Lvova M.I., Shchokolov V.S.

Three-temporal grins functions of normal boze-systems

Within the framework of variation theory complete research of lowfrequency asymptotic of multitemporal functions of Grins of the normal boze-systems is given. Source. 1.

Keywords: boze-sistem, function of Grins, brief description, lowfrequency asymptotic.

Щолоков В.С. - к.ф.-м.н., доцент кафедри «Прикладная математика» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск);

Львова М.И. - ассистент кафедры «Прикладная математика» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: *Грибанов В.М.*, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Прикладная математика» ВНУ им. В. Даля (г. Луганск).

ВИКОРИСТАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БІЗНЕСІ

Розглянуто актуальні питання використання та створення геоінформаційної системи для розв'язку різних прикладних задач, пов'язаних з управлінням у бізнесі. Викладено основні етапи створення повноцінної геоінформаційної системи. Розроблена геоінформаційна система для міста Луганськ, що орієнтована на аналіз просторової інформації та моделювання різних бізнес-рішень на основі статистичних даних. Створено відповідні атрибутивні бази даних по житловому фонду, об'єктам соціально-культурного призначення, торгових точок та по населенню. Обґрунтовано використання моделей виявлених переваг для прогнозування обороту торгового підприємства. Напрацьовані матеріали дозволяють, за допомогою геоінформаційної системи, проводити аналітичні роботи: здійснювати вибір оптимального місця розташування нового торговельного підприємства за заданими початковими умовами; давати оцінку потенційному можливому доходу торговельного підприємства з урахуванням конкурентного середовища в цьому районі міста; показувати на карті області зони впливу великих торговельних підприємств. Застосування даної методики можливо для торговельних підприємств у різних містах України. Дж. 9, рис.2.

Ключові слова: ГІС, місцезона, прогноз обороту, торгове підприємство, бізнес.

В наш час будівництво торговельних підприємств потребує набагато більше коштів, ніж раніше. Значно зросли ціни на землю та торговельні площі. Устаткування також вимагає значних інвестицій. Для досягнення обороту, який би забезпечував необхідну рентабельність, потрібен тривалий час, тому вдалий вибір місця розташування торгового підприємства [2,4] відіграє часто вирішальну роль у досягненні успіху.

Найважливішим індикатором якості місця, в якому розташовано підприємство, служить купівельна спроможність жителів району, що знаходяться в сфері впливу самого підприємства. Величина цього району залежить від характеру товару, привабливості асортименту, положення підприємств конкурентів та інших параметрів. Частота покупок продовольства, особливо свіжих товарів, дуже висока, тому в даному випадку покупці згодні долати лише невеликий шлях. Тому відстань від покупця до торгового підприємства часто вирішальна при виборі покупцем місця покупки продовольчих товарів.

Причому підприємцям доводиться мати справу з величезними обсягами інформації про продаж, клієнтів, партнерів і конкурентів, демографії жителів, списками розсилок і багато іншого. В основі всієї цієї інформації лежить географічне місце розташування. Ця інформація може бути відображена на карті, якою можна управляти в інтерактивному режимі. Управляти інформацією дозволяє геоінформаційна система або ГІС [1, 7-9]. ГІС - це інструментальний засіб для управління бізнес-інформацією будь-якого типу з точки зору її просторового розташування.

Під бізнесом Ми будемо розуміти будь-яку діяльність, спрямовану на отримання прибутку. ГІС допомагають робити прибутковий бізнес для всіх підприємців. ГІС - це інструментальний засіб для управління бізнес-інформацією будь-якого типу з точки зору її просторового розташування.

Компанії все частіше використовують можливості географічного аналізу для вирішення своїх ділових задач [1, 3, 8]. Функції просторового аналізу дозволяють, наприклад, за допомогою ГІС вирішити, де слід відкрити новий магазин, аптеку або відділення банку, ґрунтуючись на нових демографічних даних та планах розвитку міста. Ви можете відразу отримати потрібну інформацію про об'єкт, клацнувши по ньому на електронній карті. У будь-який момент Ви можете оновити інформацію, прив'язану до карти, і внесені зміни автоматично проступлять на карті. І для користування ГІС не потрібно спеціальної підготовки.

Застосування технології геомаркетингу в сфері бізнесу дуже різноманітні. Але нас цікавлять функції просторового аналізу, що дозволяють, наприклад, за допомогою ГІС вирішити, де слід відкрити новий магазин, аптеку або відділення банку, ґрунтуючись на нових демографічних даних, планах розвитку міста та інше.

Однак геоінформаційна система - це не інструмент для видачі рішень, а засіб, що допомагає прискорити і підвищити ефективність процедури прийняття рішень. Вона забезпечує відповіді на запити і функції аналізу просторових даних, подання результатів аналізу в наочному і зручному для сприйняття вигляді, а остаточне рішення залишається за людиною.

Виходячи з сказаного нами була поставлена актуальна задача створення геоінформаційної системи для міста Луганськ, яка була б орієнтована на аналіз просторової інформації та моделювання різних бізнес-рішень на основі статистичних даних.

Першим кроком до створення повноцінної геоінформаційної системи є розробка інтерактивних карт. Дане завдання досить складне і багаторівневе. Викладемо основні етапи її розв'язання.

1. Збір картографічних даних. На даному етапі відбувається збір картографічної інформації. В якості вихідних даних можуть бути використані різні карти, супутникові знімки, плани розглянутої місцевості.

2. Обробка та аналіз картографічних даних. На цьому етапі вся картографічна інформація приводиться до вигляду, придатного для подальшого використання. Також, на цьому етапі проводиться розпізнавання будівель, доріг та інших важливих об'єктів, з подальшою їх класифікацією, на основі реальних даних.

3. Створення інформаційної бази даних. На цьому етапі проектується і створюється база даних, яка буде використовуватися для обробки запитів і виведення статистичної інформації. База даних буде містити всі раніше розпізнані об'єкти.

4. Побудова алгоритмів обробки даних. На цьому етапі створюються різні алгоритми для обробки даних: отримання різного виду статистичної інформації, знаходження оптимального маршруту, обробка користувача запитів і т. і.

5. Підготовка системи для кінцевого користувача. На даному етапі відбувається переоформлення карти для додання їй більш естетичного вигляду. На карту наносяться різні умовні позначення, створюється додаткова анімація, можливе створення тривимірного представлення.

Перше завдання, яке ми взялися вирішувати - це створення «ГІС-Схід Луганська». Ця частина міста була обрана нами в якості полігону для апробації ГІС-технології на конкретній ділянці території міста (рис. 1).

Графічна база даних побудована на основі розробленого програмного забезпечення, яке дозволяє обробляти адміністративні карти міста, розпізнавати на них будинки. Програма розроблена на основі технології java-апплетів, що дозволяє запускати її як веб-додаток безпосередньо в браузері, незалежно від операційної системи на якій вона буде використовуватися. Вона включає шари: житлові будинки; об'єкти соціально-культурного призначення; торгові точки.

Створено атрибутивні бази даних. Це Бази даних по житловому фонду, об'єктів соціально-культурного призначення, торгових точок та база даних по населенню. Структура розроблених баз даних досить гнучка, що дозволяє додавати або видаляти нові класи об'єктів безболісно для інформаційної цілісності бази. ER – діаграма бази даних представлена на рис. 2. База даних повністю інтегрована в програмне забезпечення, що дає можливість за допомогою SQL-запитів виводити інформацію про будівлю в інтерактивному режимі [3].

Прогнозування обороту є центральною і найбільш складною процедурою при виборі місця розташування торгового підприємства. Менеджери часто і до цього дня, визначають показники роботи нового торгового підприємства, виходячи «з практики і досвіду». І зважаючи на наявність певних методологічних труднощів із прогнозуванням можливого обороту, виникає актуальна необхідність застосування сучасних методів для вирішення цієї задачі [2, 6].

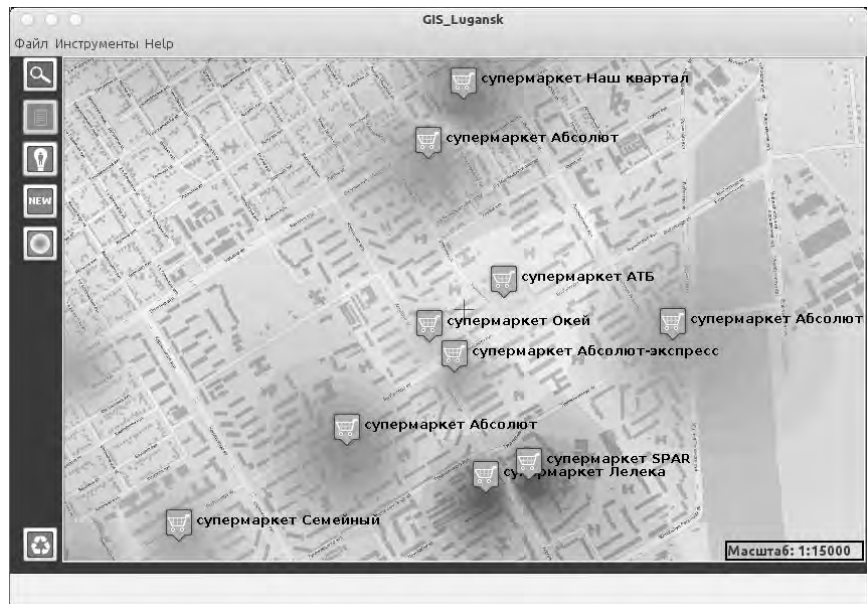


Рис. 1. Створена «ГІС-Схід Луганська»

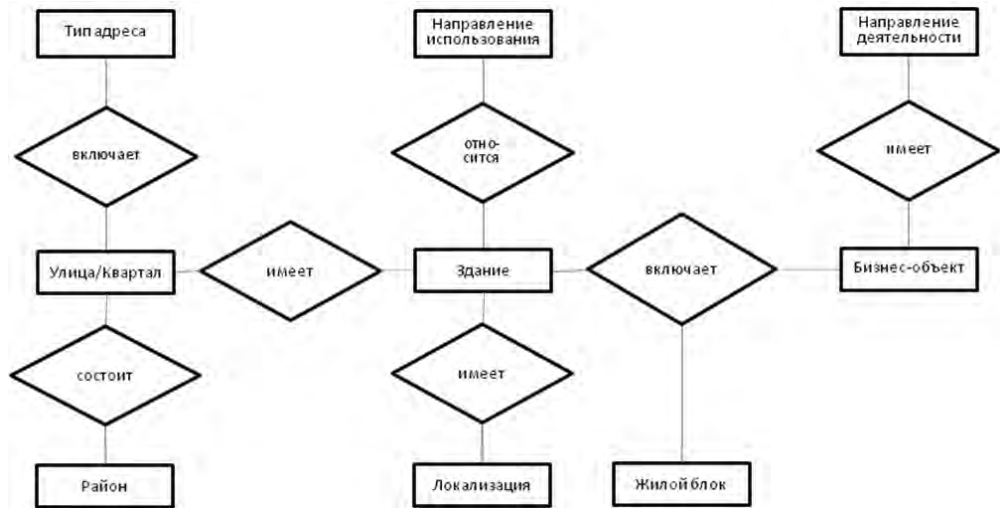


Рис. 2. ER діаграма БД

Одним з сучасних методів є використання моделей виявлених переваг, що мають мінімум дві важливі переваги в порівнянні з іншими використовуваними методами прогнозу на сьогоднішній момент [2, 4, 5]. Перша перевага полягає в можливості отримання кількісного результату з максимальною точністю. І друга важлива перевага полягає в кращій інтерпретації отримуваних результатів. Переваги використання даної методики особливо помітні, коли ставиться задача вибору місця розташування для декількох торгових точок.

Напрацьовані матеріали вже дозволяють, за допомогою ГІС, проводити аналітичні роботи: здійснювати вибір оптимального місця розташування нового торговельного об'єкта за заданими початковими умовами; давати оцінку потенційному можливому доходу торговельного об'єкта з урахуванням конкурентного середовища в цьому районі міста; показувати на карті області зони впливу великих торгових об'єктів.

Ми вважаємо, що на даний момент, можливе застосування даної методики для торговельних підприємств у великих містах України. Слід зазначити, що для супермаркетів територія можливого застосування методики значно ширше і поширюється на ще більшу кількість міст.

Литература

1. Турпалов В.Е. Геоинформационные системы в экономике: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: НФ ГУ-ВШЭ, 2007. – 118с.
2. Угаров А.С. Методы выбора местоположения торговой точки // Маркетинг в России и за рубежом №6 – 2005
3. Кучма Ю. В. Геоинформаційні системи в управлінні бізнесом / І. В. Кучма, Ю. В. Кучма, О. А. Десятіріков, А. О. Татунько // Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (вебінар) (м. Луганськ, 22-23 грудня 2010 р.). – Луганськ: Вид-во «Ноулідж», 2010. – С. 37-38.
4. Кучма Ю. В. Сучасні технології при виборі місця розташування торгових точок в межах міста / І. В. Кучма, Ю. В. Кучма // Матеріали доповідей учасників четвертої міжрегіональної науково-практичної конференції «Проблеми економіки та управління у промислових регіонах», 27-28 травня 2011 р. / відпов. ред. Гудзь П. В. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – С. 239-241.
5. Кучма Ю. В. До питання про вибір місця розташування торгового підприємства / І. В. Кучма, Ю. В. Кучма // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. - №12(142). – С. 187-191.
6. Кучма Ю. В. Прогноз обороту торгового підприємства на основі моделей виявлених переваг / І. В. Кучма, Ю. В. Кучма // Матеріали I-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання теорії та практики менеджменту» 17-19 березня 2010 року. Присвячується 90-річчю СХУ ім.В.Даля –Луганськ: ТОВ «Віртуальна реальність», 2010. – С.352-353.
7. Бугаевский Л.М., Цветков В.Я. Геоинформационные системы. Учебное пособие для вузов. – М.:2000. – 222 с.,; ил. 28.
8. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: Монография. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.
9. Самардак А.С. Геоинформационные системы: Учебник. — Владивосток: ДВГУ, 2005. — 124 с.

References

1. Turpalov V.E. Geoinformacionnyye sistemy v jekonomike: Uchebno-metodicheskoe posobie. – Nizhnij Novgorod: NF GU-VShJe, 2007. – 118s.
2. Ugarov A.S. Metody vybora mestopolozhenija torgovoj točki // Marketing v Rossii i za rubezhom №6 – 2005
3. Kuchma Ju. V. Geoinformacijni sistemi v upravlinni biznesom / I. V. Kuchma, Ju. V. Kuchma, O. A. Desjatirikov, A. O. Tatun'ko // Komp'juterni nauki dlja informacijnogo suspil'stva: Materiali mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencii studentiv, aspirantiv ta molodih vchenih (vebinar) (m. Lugans'k, 22-23 grudnja 2010 r.). – Lugans'k: Vid-vo «Noulidzh», 2010. – S. 37-38.
4. Kuchma Ju. V. Suchasni tehnologiiï pri vibori miscja roztashuvannja torgovih tochk v mezahh міста / I. V. Kuchma, Ju. V. Kuchma // Materiali dopovidej uchasnikiv chetvertoï mizhregional'noï naukovo-praktichnoï konferencii «Problemi ekonomiki ta upravlinnja u promislovih regionah», 27-28 travnja 2011 r. / vidpov. red. Gudz' P. V. – Zaporizhzhja: ZNTU, 2011. – S. 239-241.
5. Kuchma Ju. V. Do pitannja pro vibir miscja roztashuvannja torgovogo pidpriemstva / I. V. Kuchma, Ju. V. Kuchma // Visnik Shidnoukrais'nkogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – 2009. - №12(142). – S. 187-191.
6. Kuchma Ju. V. Prognoz oborotu torgovogo pidpriemstva na osnovi modelej vijavlenih perevag / I. V. Kuchma, Ju. V. Kuchma // Materiali I-oï Vseukrais'koï naukovo-praktichnoï konferencii studentiv, aspirantiv ta molodih vchenih «Aktual'ni pitannja teorii ta praktiki menedzhmentu» 17-19 bereznja 2010 roku. Prisivjachuetsja 90-richchju SNU im.V.Dalja –Lugans'k: TOV «Virtual'na real'nist'», 2010. – S.352-353.
7. Bugaevskij L.M., Cvetkov V.Ja. Geoinformacionnyye sistemy. Uchebnoe posobie dlja vu-zov. – M.:2000. – 222 s.,; il. 28.
8. Karpik A.P. Metodologicheskie i tehnologicheskie osnovy geoinformacionnogo obespechenija territorij: Monografija. – Novosibirsk: SGGGA, 2004. – 260 s.
9. Samardak A.S. Geoinformacionnyye sistemy: Uchebnik. — Vladivostok: DVGU, 2005. — 124 s.

Данич В.Н., Кучма Ю.В.

Использование геоинформационных технологий в бизнесе

Рассмотрены актуальные вопросы использования и создания геоинформационной системы для решения различных прикладных задач, связанных с управлением в бизнесе. Изложены основные этапы создания полноценной геоинформационной системы. Разработана геоинформационная система для города Луганск, ориентированная на анализ пространственной информации и моделирование различных бизнес-решений на основе статистических данных. Созданы соответствующие атрибутивные базы данных по жилищному фонду, объектам социально-культурного назначения, торговых точек и по населению. Обосновано использование моделей выявленных предпочтений для прогнозирования оборота торгового предприятия. Нарботанные материалы позволяют, с помощью геоинформационной системы, проводить аналитические работы: осуществлять выбор оптимального местоположения нового торгового предприятия по заданным начальным условиям; давать оценку потенциальному возможному доходу торгового предприятия с учетом конкурентной среды в этом районе города; показывать на карте области зоны влияния крупных торговых предприятий. Применение данной методики возможно для торговых предприятий в разных городах Украины. Лит. 9, рис.2.

Ключевые слова: ГИС, местоположение, прогноз оборота, торговое предприятие, бизнес.

Danich V.M., Kuchma Yu.V.

Using of GIS technology in business

The actual issues of the creation and usage of geographic information system are considered for solving of various applied problems related to the management in business. The basic stages of creating a complete geoinformation system are presented. A geographic information system for the city of Lugansk focused on spatial data analysis and modeling of various business decisions based on statistics data is developed. A related attribute databases for housing, social and cultural facilities, sales outlets and population. Using of the revealed preferences models for forecasting incomes of a company is substantiated. Proposed materials allow conducting analytical explores using the geoinformation system: to choose the optimal location of new commercial project by the given the initial conditions, to estimate potential income of retailer considering the competitive environment in the current district of the city, to indicate the areas of influence of major retailers on the map. Application of this method is possible for commercial facilities in different cities of Ukraine. J. 9, Figure 2.

Keywords: GIS, location, prognosis turnover, trading company, business.

Данич Віталій Миколайович – д.е.н., проф., декан факультету менеджменту Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Кучма Юрій Володимирович – к.т.н., доцент кафедри «Прикладна математика» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Пожидасв В.Ф., д.т.н., проф., завідувач кафедри «Інформатика» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

**МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛІНСЬКИХ АРХІТЕКТУР ПІДПРИЄМСТВ
ВУГІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ**

В статті запропоновано теоретико-множинні моделі інформаційно-управлінських архітектур підприємств вугільної галузі. Моделі ІУА є основою для подальшої формалізації динаміки ІУА. Формальне представлення динаміки підприємств є фундаментом прогнозування їх розвитку, а також дає можливість передбачати вплив результатів змін на функціональність всіх підсистем вугледобувного підприємства та реалізацію стратегічної мети.

Ключові слова: інформаційно-управлінські архітектури, теоретико-множинна модель, формалізація, динаміка, прогнозування, економіко-математичне моделювання, шар, елемент, зв'язок, відношення, множина, взаємозв'язок.

Актуальність дослідження. Побудова формальної моделі інформаційно-управлінської архітектури дозволить створити дієві інструменти моніторингу ІУА, і також дасть змогу прогнозувати динаміку ІУА та ефективно здійснювати зміни на підприємствах вугільної галузі.

Постановка проблеми. Інформаційно-управлінською архітектурою (ІУА) згідно [2] ми називаємо основні елементи та зв'язки системи управління підприємством, які утворюють її каркас. Таке визначення не є чітким, бо поняття основних елементів залежить від точки зору дослідника, мети і задач дослідження. Проте, воно в найбільшій мірі відповідає задачі управління розвитком самої системи управління сучасним підприємством. Таке управління є обґрунтованим і конструктивним тільки за наявності моделі розвитку ІУА, тобто моделі її динаміки.

Основою динаміки інформаційно-управлінських архітектур (ІУА) є елементарні перетворення. Їх класифікація дозволяє виявити та формалізувати взаємозв'язки між станами архітектури в різні моменти часу і складає основу побудови моделей динаміки.

Для виявлення перетворень та їх моделей необхідно, в першу чергу, визначитися з моделями самих інформаційно-управлінських архітектур. Одні з найбільш розповсюджених моделей складних систем – це теоретико-множинні, що є математичними моделями абстрактно-алгебраїчного типу, де система подається у вигляді сукупності відношень, які визначаються як підмножини декартового добутку множин. Множинний опис є універсальною моделлю, т.я. може застосовуватися до широкого класу систем.

Теоретичний аналіз дослідження. Проблема формального представлення організаційних структур та їх перетворень розглядалася в роботах з менеджменту, економіко-математичного моделювання, системного аналізу, зокрема, в [1-2], а також такими авторами, як Колосов [4], Мескон [5], Мінцберг [7], Холл [8]. Класи елементарних перетворень були виділені в [3]. Однак, математичних формалізмів, які б описували інформаційно-управлінську архітектуру та дозволяли вільно оперувати класами перетворень в задачах прогнозу розвитку архітектур, бракує.

Мета статті. Уточнення сутності поняття «моделювання», прогнозування з прийнятною ймовірністю поведінки інформаційно-управлінської архітектури, передбачення результатів змін, що проходять в ІУА.

Задачі дослідження. Побудувати теоретико-множинні моделі інформаційно-управлінських архітектур підприємств як основу для подальшого моделювання їх динаміки, виявлення характерних, домінантних властивостей досліджуваного об'єкту.

Викладення основного матеріалу.

Структуру системи управління часто називають організаційною структурою. В економічних системах поняття системи управління часто звужують, при цьому мають на увазі тільки систему управління персоналом в процесі виробництва, систему віддавання розпоряджень та забезпечення їх виконання. Поняття «організаційна структура» ширше, ніж поняття «структура системи управління». Цей тезис підтверджує поняття виробни-

чої структури, яка є частиною організаційної структури, її шаром, який характеризує взаємозв'язки елементів системи в процесі виробничої діяльності, в технологічному процесі видобутку вугілля від геологічної розвідки до відвантаження вугілля покупцям. Однак, виробнича структура зазвичай не включається в структуру системи управління, яку розуміють у вузькому сенсі.

Розглянемо більш детально поняття шару. Воно є різновидом поняття підсистема, яке контекстно характеризує саму підсистему та її структуру. Розбиття системи та її структури на шари є декомпозицією цієї системи на певну кількість підсистем, відносно незалежних одна від одної, які характеризують систему з різних боків та за різних ознак. Шар Σ^1 представляє собою деяку сукупність підмножини E^1 елементів системи ($E^1 \subseteq E$) та підмножини C^1 зв'язків системи ($C^1 \subseteq C$), що мають визначену цільність та якість. E та C – множини елементів та зв'язків системи Γ .

Визначимося з терміном «шар». Шар $\Gamma \cup A$ – це сукупність множини елементів, які відповідають певній характеристичній властивості та множини зв'язків між цими елементами:

$$\Sigma^i = \langle E^i, C^i \rangle \quad (1)$$

де Σ^i – шар, E^i – множина елементів, C^i – множина зв'язків шару.

До шарів-підсистем в організації відносяться виробнича, управлінська, територіальна, інформаційна та інші підсистеми.

Термін «шар» доречний з багатьох причин. Перш за все, він відображає відносно відокремлений, «плаский», планарний (такий, що вкладається на площину без перетинання) характер структури підсистеми, її зв'язків, що відносяться до деякого виділеного атрибуту об'єкта-системи.

Відособленість носить атрибутний характер, що позначає, з одного боку, деяку властивість, характерну особливість елементів та зв'язків системи в цілому, а з іншої – підкреслює взаємозв'язок шарів через взаємозв'язок, поєднаність атрибутів в елементі системи. Цей взаємозв'язок можна інтерпретувати як відношення відношень, як відображення шарів. Наведемо приклад.

Нехай підсистема Σ^1 складається з множин елементів E^1 та зв'язків C^1 , підсистема Σ^2 складається з множин елементів E^2 та зв'язків C^2 , $\Sigma^1 = \langle E^1, C^1 \rangle$, $\Sigma^2 = \langle E^2, C^2 \rangle$. Множини E^1 та E^2 , C^1 та C^2 не перетинаються, $E^1 \cap E^2 = \emptyset$, $C^1 \cap C^2 = \emptyset$. Належність елементів та зв'язків до кожної підсистеми визначається характерною властивістю, при цьому кінець та початок зв'язку повинні бути елементами відповідної множини.

Між елементами множин E^1 та E^2 може існувати відповідність, яка виражається відношенням, деякою підмножиною декартового добутку $E^1 \times E^2$, що має чітку семантику. Зв'язкам приналежності між елементами шару Σ^1 будуть відповідати зв'язки підпорядкування між елементами шару Σ^2 . Прикладом є відповідність підрозділів та посад їх керівників. Це різні, але нерозривно пов'язані сутності. Множини підрозділів, що пов'язані відношенням входження, приналежності, відповідає множина посад, які пов'язані відношенням підпорядкованості. Ці множини та відношення існують паралельно, в різних шарах, але тісно пов'язані семантично (підрозділу відповідає посада керівника). В цьому прикладі відповідність між елементами різних шарів обумовлює і відповідність між зв'язками цих елементів, мова йде про відношення відношень або про відображення графів.

Розглянемо це більш детально. Нехай, множини елементів E та C системи Σ ($\Sigma = \langle E, C \rangle$) можна представити у вигляді об'єднання множин, які не перетинаються: $E = \bigcup_{i=1}^m E^i$, $C = \bigcup_{i=1}^m C^i$. Тут $\Sigma^i = \langle E^i, C^i \rangle$ – шар-підсистема системи Σ . Ілюструємо цей підхід наступним прикладом (табл. 1):

Шари організаційної структури

Позначки шарів	Тип елемента	Номер елемента								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Σ^1	Підрозділ	Ділянка поверхні технологічного комплексу	Відділ економіки	Ділянка з видобутку вугілля 1	Ділянка з видобутку вугілля 2	Ділянка з видобутку вугілля 3	Бухгалтерія	Підприємство		
Σ^2	Посада	Начальник ділянки	Зав. відділом	Начальник ділянки з видобутку вугілля 1	Начальник ділянки з видобутку вугілля 2	Начальник ділянки з видобутку вугілля 3	Головний бухгалтер	Директор	Заст. з виробництва	Заст. з економічних питань
Σ^3	Функція		Управління	Управління	Управління	Управління	Управління	Управління	Управління	Управління
Σ^4	Функція	Приймання та відвантаження вугілля	Постачання та збут	Добуток вугілля	Добуток вугілля	Добуток вугілля	облік		Добуток вугілля	Постачання та збут
Σ^5	ІТ-підтримка	ІС: Склад	ІС: Збут	ІС: виробництво	ІС: виробництво	ІС: виробництво	ІС: Бухгалтерія	ІС: підприємство	ІС: підприємство	ІС: підприємство
Σ^6	ІТ-апарат	ПК 1	ПК 2	ПК 3	ПК 4	ПК 5	ПК 6	ПК 7	ПК 8	ПК 9

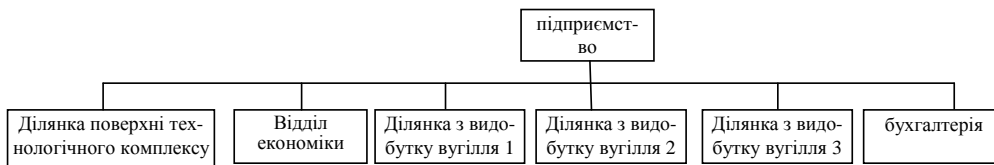


Рис 1. Фрагмент структури шару підрозділів організаційної структури.



Рис 2. Фрагмент структури шару підпорядкованості посад (штрихова лінія – функціональна підпорядкованість)

Таким чином, приходимо до діаграм «об'єкт-відношення», які характерні для реляційних баз даних. Оперуючи множиною шарів, на перший план вносимо поняття відношення між елементами, які мають одну характеристичну ознаку. Оперуючи множиною сутностей, на перший план вносимо поняття відношення між атрибутами однієї сутності. Ієрархічні відношення в межах шару показують таку різницю. Це визначає переваги розглядання концепції шарів у випадку ієрархічних відношень.

Ілюстрацією розподілу організаційної структури на шари є система циліндрів та площин, які перетинають ці циліндри. Циліндр представляє собою структуру з атрибутами, які відповідають елементам різних шарів.

Зв'язок в математичному аспекті еквівалентний поняттю «відношення». В організаційній структурі мають місце відношення еквівалентності, приналежності, підпорядкованості, територіального, матеріального зв'язку, інформаційного, інформаційно-технічного. Зазвичай, це відношення слідування, порядку, тому організаційні структури дуже часто ієрархічні, мають вигляд дерева, але виробнича структура часто не є деревоподібною, вона представляє собою граф загального виду.

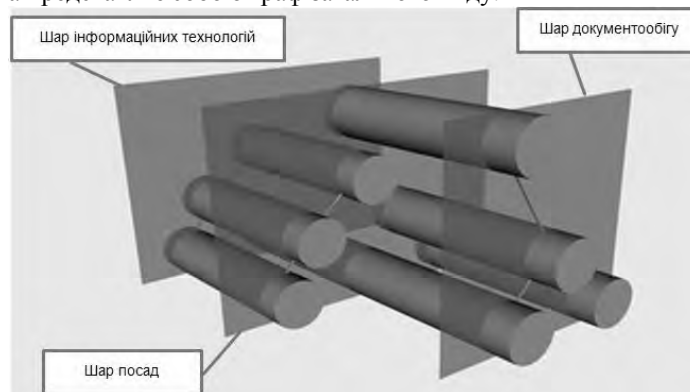


Рис 3. Ілюстрація шарів організаційних структур

Характерною особливістю інформаційно-управлінської структури сучасного підприємства є різноманітність, різнорідність елементів, з яких вона складається. Посади, підрозділи, канали та техніка зв'язку, техніка та технології накопичування інформації, – це тільки частина різноманітності. По відношенню до техніки, що використовується, інформаційних мереж, програмних продуктів в науковій літературі використовується термін «архітектура»: архітектура процесора, програмного комплексу локальної та глобальної мережі і т.і. Термін «архітектура» майже синонімічний до терміну «структура», однак, використовується в ситуаціях, коли необхідно підкреслити різнорідність елементів, які складають одне ціле, їх утилітарну та естетичну, в деякому розумінні, сутність.

Інформаційно-управлінська архітектура має дві складові – управлінську та інформаційну, які можна розглядати як гіпершари, які включають в себе інші шари. Наприклад, управлінська складова містить шар посад, всередині цього шару виділяємо посади в певному порядку, який залежить від рівня менеджера.

Елементи різних шарів ІУА можуть бути пов'язані за деякими ознаками та виступають як характеристики чи властивості елементів або зв'язків інших шарів, тому перетворення шарів є найбільш значущими для ІУА. Додавання, видалення або зміна структури одного шару становляться «поштовок», каталізатором змін в інших шарах ІУА, в тому числі в системі зв'язків.

Кількість шарів заздалегідь не обумовлюється, але структура самих шарів відома.

Інформаційно-управлінську архітектуру підприємства можна представити як сукупність всіх шарів:

$$A = \langle \langle E^1, C^1 \rangle, \langle E^2, C^2 \rangle, \dots, \langle E^n, C^n \rangle \rangle, \quad (2)$$

де n – кількість шарів.

Розглянемо вищезазначене на прикладі відокремленого підприємства «Шахта «Крепінська»» державного підприємства «Антрацит». В результаті моніторингу була виявлена наступна інформаційно-управлінська архітектура (рис. 4).

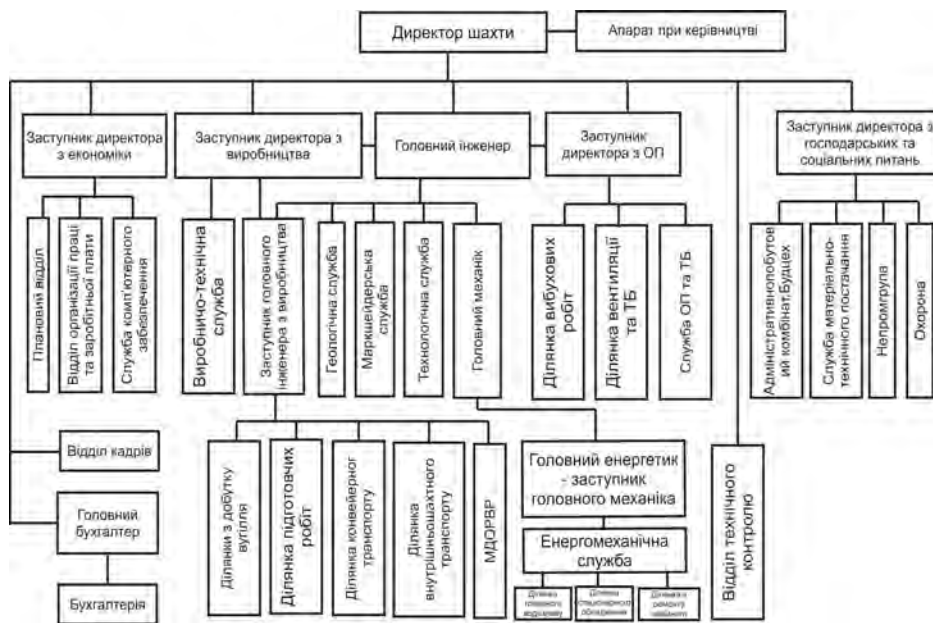


Рис. 4. Інформаційно-управлінська архітектура ВП «Шахта «Партизанська»» ДП «Антрацит»

Виділимо наступні шари: Σ^m – управлінський, Σ^{ND} – документообігу, Σ^{hh} – побутовий, Σ^a – адміністративний, Σ^{IT} – інформаційних технологій, Σ^{fe} – фінансово-економічний, Σ^{au} – допоміжний. Інформаційно-управлінська архітектура є сукупністю даних шарів:

$$A = \langle \langle E^m, C^m \rangle, \langle E^{ND}, C^{ND} \rangle, \langle E^{hh}, C^{hh} \rangle, \langle E^a, C^a \rangle, \langle E^{IT}, C^{IT} \rangle, \langle E^{fe}, C^{fe} \rangle, \langle E^{au}, C^{au} \rangle \rangle \quad (3)$$

Множини E^i можуть мати наступний зміст:

- 1) P – множина посад підприємства;
- 2) D – множина підрозділів підприємства;
- 3) F – множина функцій;
- 4) ND – нормативні документи, накази, посадові інструкції і т. і.;
- 5) ST – множина обчислювальних засобів;
- 6) S – множина програмних засобів.

Вищезазначені підмножини мають різну природу і є взаємопов'язаними, утворюють відношення, які мають характер приналежності, властивостей, обмежень і т.і. Елементи множин F та ND виступають як самостійні елементи та водночас як властивості, обмеження елементів множин P (посад) та D (підрозділів).

Кожний елемент IYA має декілька рівнів розглядання, на будь-якому рівні мають місце власні характеристики та характеристики взаємозв'язку з іншими рівнями та шарами. Наприклад, підрозділ IYA має як мінімум трьохшарову структуру – це територіальний шар, шар обладнання (в тому числі комп'ютерної техніки), шар посад. Кількість шарів залежить від ступеня деталізації конкретного елемента IYA, рівнів розглядання.

Висновки: побудовані теоретико-множинні моделі інформаційно-управлінських архітектур, формалізовано описання об'єктів перетворень.

Література

1. Данич В.Н. Моделирование быстрых социально-экономических процессов : монография / В.Н. Данич – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2004. – 304 с.
2. Даніч В.М. Стан і динаміка розвитку інформаційно-управлінських архітектур підприємств регіону/ В.М. Даніч, С.М. Танченко // Сіверянський літопис, Чернігів: Вид. ЧДІЕіУ, 2002, №3. – С. 190-198.
3. Даніч В.М. Класи елементарних перетворень в динаміці інформаційно-управлінських архітектур / В.М. Даніч, С.М. Шевченко // Актуальні питання теорії та практики менеджменту: матеріали II-ї міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Луганськ, 16-18 березня 2011 року) / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля. – Луганськ: Віртуальна реальність, 2011. – С. 368-370.
4. Колосов А.Н. Адаптивная организация деятельности предприятия : монография / А.Н. Колосов – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2008. – 440с.
5. Мескон М. Основы менеджмента / Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф.; пер. с англ. / общ. ред. и вступ. статья Л.И. Евенко - М.: Дело, 1998. - 799 с.
6. Милнер Б.З. Теория организаций / Б.З. Милнер – М.: ИНФРА-М, 1998. – 336 с.
7. Минцберг Г. Структура в кулаке: Создание эффективной организации / Г. Минцберг ; пер. с англ. под ред. Ю. Н. Каптуревского – СПб.: Питер, 2004. – 512 с.
8. Холл Р.Х. Организации: структуры, процессы, результаты / Р.Х. Холл – СПб: Питер, 2001. – 512 с.

References

1. Danich V.N. Modelirovanie bystrykh social'no-jekonomicheskikh processov : monografija / V.N. Danich – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalja, 2004. – 304 s.
2. Danich V.M. Stan i dinamika rozvitku informacijno-upravlins'kih arhitektur pidpri-emstv regionu/ V.M. Danich, S.M. Tanchenko // Siverjans'kij litopis, Chernigiv: Vid. ChDIEiU, 2002, №3. – S. 190-198.
3. Danich V.M. Klasi elementarnih peretvoren' v dinamici informacijno-upravlins'kih arhitektur / V.M. Danich, S.M. Shevchenko // Aktual'ni pitannja teorii ta praktiki menedzhmentu: materialy II-oї mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencii studentiv, aspirantiv ta molodih vchenih (Lugans'k, 16-18 bereznja 2011 roku) / Ministerstvo osviti i nauki, molodi ta sportu Ukraї-ni, Shidnoukraїns'kij nacional'nij universitet im. Volodimira Dalja. – Lugans'k: Virtual'na real'nist', 2011. – S. 368-370.
4. Kolosov A.N. Adaptivnaja organizacija dejatel'nosti predprijatija : monografija / A.N. Kolosov – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalja, 2008. – 440s.
5. Meskon M. Osnovy menedzhmenta / Meskon M., Al'bert M., Hedouri F.; per. s angl. / obw. red. i vstup. stat'ja L.I. Evenko - M.: Delo, 1998. - 799 s.
6. Milner B.Z. Teorija organizacij / B.Z. Milner – M.: INFRA-M, 1998. – 336 s.
7. Mincberg G. Struktura v kulake: Sozdanie jeffektivnoj organizacii / G. Mincberg ; per. s angl. pod red. Ju. N. Kapturevskogo – SPb.: Piter, 2004. – 512 s.
8. Holl R.H. Organizacii: struktury, processy, rezul'taty / R.H. Holl – SPb: Piter, 2001. – 512 s.

Данич В.Н., Шевченко С.Н.

МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИХ АРХИТЕКТУР ПРЕДПРИЯТИЙ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

В статье предложены теоретико-множественные модели информационно-управленческих архитектур предприятий угольной отрасли. Модели ИУА являются основой формализации динамики ИУА в дальнейшем. Формальное представление динамики предприятий является фундаментом для прогнозирования их развития, а также даёт возможность предвидеть влияние результатов изменений на функциональность всех подсистем угледобывающего предприятия и на реализацию стратегической цели.

Ключевые слова: *информационно-управленческая архитектура, теоретико-множественная модель, формализация, динамика, прогнозирование, экономико-математическое моделирование, слой, элемент, связь, отношение, множество, взаимосвязь.*

Danich V.M., Shevchenko S.M.

THE MODEL OF INFORMATION- ADMINISTRATIVE ARCHITECTURES OF THE COAL INDUSTRY ENTERPRISES

In this article we propose the set-theoretical model of information-administrative enterprise architectures of the coal industry. Model IAA are the basis of formalization of dynamics of IAA in the

future. A formal representation of the dynamics of enterprises is the basis for the prediction of their development, and also gives the opportunity to predict the impact of changes to the functionality of all the subsystems coal mining enterprise and the realization of the strategic goals.

Keywords: *information administrative architecture, theoretical-multiple model, formalization, dynamics, forecasting, economic-mathematical modeling, the layer, the element, communication, an attitude, a lot of that relationship.*

Даніч Віталій Миколайович – д.е.н., проф., декан факультету менеджменту Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ);

Шевченко Світлана Миколаївна – аспірант Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Пожидасв В.Ф., д.т.н., проф., завідувач кафедри «Інформатика» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ).

УДК 65.011.48 : 658.14.012.2

П. В. Кривуля, В. В. Дьоміна

м. Луганськ

НОВІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТУ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ТА КОМБІНОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

Обґрунтовано можливість та доцільності використання підходу до оцінки ефекту диверсифікації, який використовує більш традиційні підходи до оцінки рівня ризику, але відрізняється від підходу Г. Марковіца та є більш адекватним умовам господарювання виробничих підприємств. Дж. 3.

Ключові слова: *виробниче підприємство, диверсифікація, ефект диверсифікації, комбінування виробництв, ризик.*

Введення до проблеми. Ефект диверсифікації розглядають зазвичай згідно з інтерпретацією ефекту диверсифікації фінансових активів, яку запропоновано Г. Марковіцем, тобто ствердження про те, що сукупний ризик за рахунок негативного коефіцієнта кореляції попиту двох товарів може бути і менше, ніж для кожного товару окремо. Але ж модель Марковіца не має повної відповідності умовам виникнення ефекту диверсифікації від реальних інвестицій, – хоча б через те, що невизначеність (варіативність) показників завантаження устаткування по кожному окремому продукту не підсумовується, та не компенсує одна одну. Крім того в моделі Марковіца розглядають фінансові активи, прибутковості яких не впливають один на одного, і модель показує ефект диверсифікації за рахунок відмінності в поведінці (реакції на зміни кон'юнктури ринку) різних активів. Розгляд же асортименту виробничого підприємства показує, що товари можуть бути не лише такими, що корелюють, але і доповнюють, тобто впливають на попит один одного, наприклад, як автомобіль і запчастини до нього, – покупець прийме рішення про купівлю автомобіля певної марки швидше за все у тому випадку, якщо в тому ж салоні він зможе у будь-який момент придбати запчастини до нього, і в даному випадку продаж запчастин можливо й є менш рентабельним, ніж продаж автомобіля, та з точки зору показників економічної ефективності підприємству слід було б відмовитися від цих позицій у асортименті, але вигоди від впливу наявності цих позицій в асортименті на обсяги продажів рентабельніших позицій (в даному випадку автомобіля) і відповідно зниження сукупного ризику недозавантаження устаткування роблять таке рішення неприйнятним. Також високий рівень невизначеності (ризик) попиту на один продукт можливо нівелювати за рахунок того, що в асортименті представлені також інші продукти, конкурентів по яких можливо немає. Відповідно, звертаючись за цим другим продуктом, покупець придбає відразу ж і перший, скоротивши при цьому свої

транзакційні витрати. У такому разі навіть якщо рентабельність допоміжного продукту найнижча в порівнянні з основними, то підприємству не вигідно відмовлятися від їхнього виробництва, оскільки у разі відмови рівень упевненості в очікуваних обсягах продажів знизиться і рішення про їх виробництво в запланованому обсязі характеризуватиметься високим рівнем ризику.

Стан дослідженості питання. Спосіб розрахунку ефекту диверсифікації було запропоновано Г. Марковіцем [3], та з того часу підхід до його розрахунку не було змінено. Але ж навіть спосіб розрахунку ризику у моделі Г. Марковіца не відповідає традиційному сприйняттю поняття ризику, бо не обов'язково є пов'язаним з певною дією та є оцінкою впевненості а не ризику. Поняття ризику зазвичай визначають інакше, так наприклад традиційний показник ризику – коефіцієнт ризику – співставляє очікуване та заплановані результати: «Коефіцієнт ризику в загальному вигляді показує співвідношення очікуваних величин негативних і позитивних відхилень показників від запланованого рівня. Він містить: розподіл показників результатів для розрахунку очікуваних значень величин; значення показників, що відносяться до планованих ситуацій (припустимо, що для кожної ситуації встановлено єдине значення показника); абсолютні розміри прибутку та втрат, що відносяться до різних ситуацій» [2, с. 69]. Але й інші зауваження то способу розрахунку Г. Марковіца. Так підприємства мають отримати ефект від спеціалізації та виробничі операції мають бути пов'язаними, а не навпаки. Підприємства-комбінати також знижують ризик, хоча й не можуть обґрунтувати таке зниження ризику через модель Марковіца.

Розглянемо, наприклад, вплив диверсифікації портфеля господарської діяльності на рівень ризику у разі її поєднання з горизонтальним комбінуванням на основі праці і засобів праці. На рис. 1 схематично відображено горизонтальний та вертикальний зріз галузей, та можлива границя фірми. Відбувається дозавантаження устаткування, K_3 по різних продуктах підсумовуються, такий ефект є наслідком комбінування виробництва.

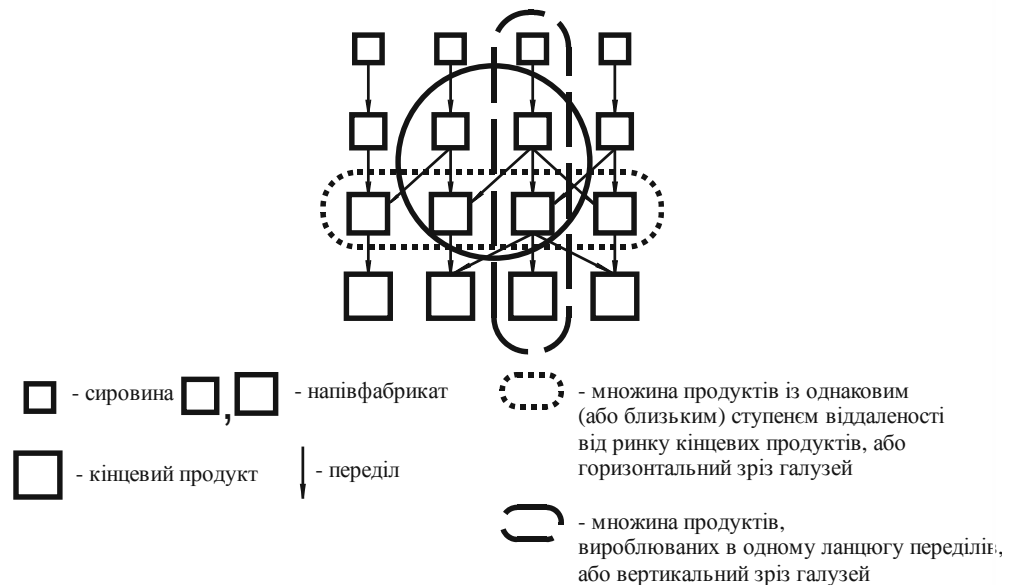


Рис. 1. Границя фірми для підприємства-комбінату

Так, наприклад, високий рівень невизначеності (ризик) попиту на клинки рапіри ЗАТ «ЗМВ «Динамо» (одне з підприємств, що складають інформаційну базу дослідження) можливо нівелювати за рахунок того, що в асортименті заводу представлені також клинки шабел, конкурентів по яких у ЗАТ практично немає. Відповідно, звертаючись за клинками для шаблі, покупець придбає відразу ж і клинки для рапір і шпаг, скоротивши при цьому свої транзакційні витрати. Таким чином сформований асортимент заводу дає

можливість звести сукупний ризик до рівня ризику клинків для шабель. Також слід зазначити, що навіть якщо рентабельність шабель найнижча в порівнянні з іншими товарами, то ЗАТ не вигідно відмовлятися від її виробництва, оскільки у разі відмови рівень упевненості в очікуваних обсягах продажів рапір і шпаг знизиться і рішення про їх виробництво в запланованому обсязі характеризуватиметься високим рівнем ризику.

Певні кроки до зміни портфельної задачі Марковіца було викладено у статті, але сам спосіб розрахунку ефекту диверсифікації не було змінено, хоча таку можливість слід дослідити.

Мета статті полягає у обґрунтуванні можливості та доцільності використання підходу до оцінки ефекту диверсифікації, який відрізняється від піходу Г. Марковіца та є більш адекватним умовам господарювання виробничих підприємств.

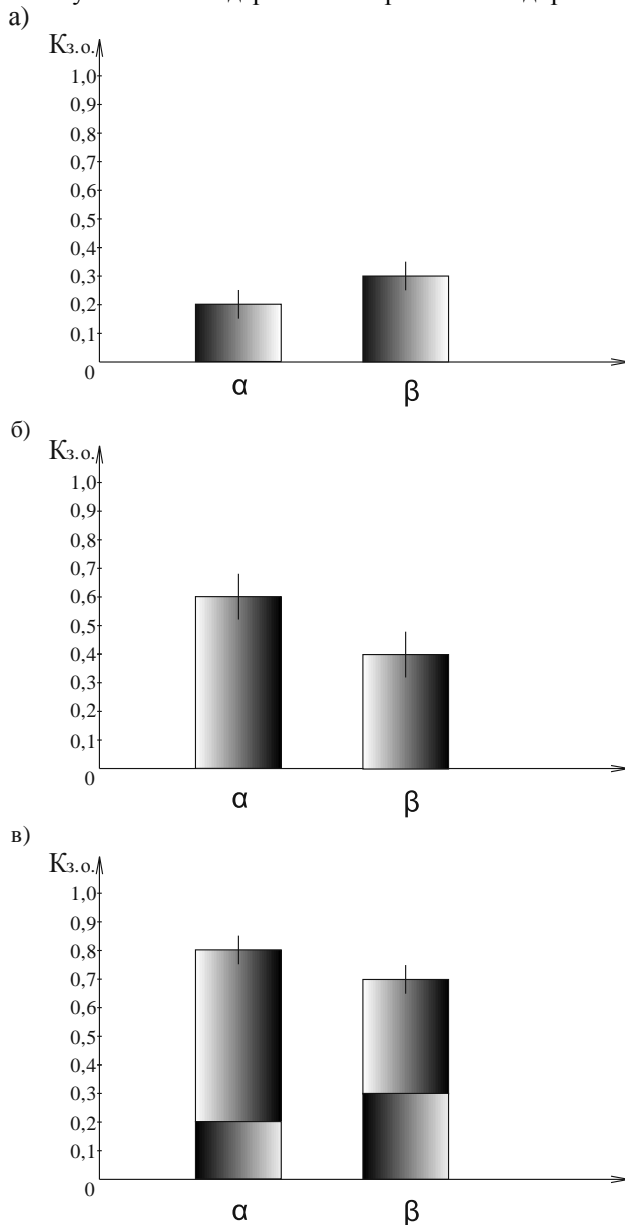


Рис. 2. Схема ефекту комбінування виробництва і диверсифікації, як підвищення завантаження устаткування та впевненості в його планових показниках

Отримані результати. Вплив диверсифікації на коефіцієнт завантаження устаткування, яке виражається у підвищенні впевненості в його очікуваних значеннях, є як ефектом зв'язаної диверсифікації, так і ефектом комбінування виробництва, як засобу диверсифікації. Складаючи портфель з товарів, які при реалізації складають комплект підприємство за рахунок комплектних продажів може не лише звести сукупний рівень ризику до рівня показника товару з мінімальним значенням цього показника, але і підвищити середній рівень обсягів реалізації по товарах, що є менш конкурентоспроможними.

Підвищення впевненості в завантаженні устаткування більшою мірою все ж відноситься до ефекту диверсифікації, хоча і може бути зв'язано (або навіть визначено) комбінуванням виробництва. Забезпечити підвищення впевненості в необхідному рівні реалізації можна за рахунок управління портфелем господарської діяльності – забезпеченням прихильності клієнтів, лояльності і переваги на користь того набору продуктів, який пропонує підприємство. Різниця між традиційним розумінням конкурентоспроможності продукту і ефектом диверсифікації в даному випадку полягає в тому, що в даному випадку слід говорити не про привабливість окремого продукту, а про привабливість продавця (виробника), що пропонує комплект продуктів, який або знижує транзакційні витрати клієнтів, або дозволяє їм здійснювати дії (споживання), неможливе або неповне без комплексного забезпечення (наприклад, подушка/ковдра або стіл/стілець), або підтримує його вибір на користь продукту цього виробника (наприклад, запчастини для певної марки автомобіля), або надає йому базу порівняння при купівлі (іноді асортиментні лінійки створюють саме з цією метою – пред'являють товар, який менш прийнятний за якістю, щоб зробити покупця впевненішим у своїй перевазі і тим самим стимулювати чергові продажі або навіть обсяг продажів), або стимулює імпульсні покупки. У зв'язку з чим можуть проявитися як незв'язаний ефект диверсифікації, за рахунок негативної або такої, що наближається до нуля кореляції попиту товарів (по аналогії з ефектом диверсифікації в моделі Марковіца), так і пов'язаний ефект диверсифікації, коли вступають у дію такі чинники ефекту диверсифікації, як комплексні продажі.

Розрахунок ефекту незв'язаної диверсифікації може йти шляхом схожим з розрахунком портфельного ризику в моделі Марковіца. В той же час розрахунок пов'язаного ефекту диверсифікації має спиратися на більш традиційні показники рівня ризику (порівняно з середньоквадратичним відхиленням, яке увійшло до арсеналу ризик-менеджменту дещо пізніше), – наприклад, на ймовірність нездійснення планового обсягу реалізації, або коефіцієнт, що співвідносить планові і прогностичні продажі. У останньому випадку ефект диверсифікації полягатиме в підвищенні імовірності планових продажів, або в зміщенні (збільшенні) математичного сподівання обсягу реалізації (що є прогнозною величиною). В даному випадку ефект диверсифікації може отримати декілька різних варіантів оцінки, – розглянемо один з можливих.

Якщо розподіл ймовірностей обсягів продажів нормальний та планова величина випуску (Π) менше математичного сподівання попиту (M) (виходимо з того, що розподіл ймовірностей обсягів продажів нормальний), то ймовірність того, що замовлення буде менше планової величини випуску, дорівнює тій частині площі під фрагментом кривої, яка розташована зліва від проведеного через значення планового випуску перпендикуляра до осі абсцис (рис. 3). Ймовірність того, що замовлення перевищить запланований обсяг випуску відповідно дорівнює частині площі праворуч від перпендикуляра. В сумі ці дві величини, позначимо їх χ і ϕ , відповідно дають одиницю.

Але, обчислити ризик можна й інакше, наприклад, як відношення планової величини до математичного очікування, тобто прогнозу обсягу реалізації. Позначимо такий показник R_1 (формула 1). Збільшення R_1 свідчатиме про зниження ризику (підвищення впевненості), відповідно збільшення зворотного показника (R'_1) говоритиме про підвищення рівня ризику.

$$R_1 = \frac{\Pi}{M}, \quad R'_1 = \frac{\Pi}{M}. \quad (1)$$

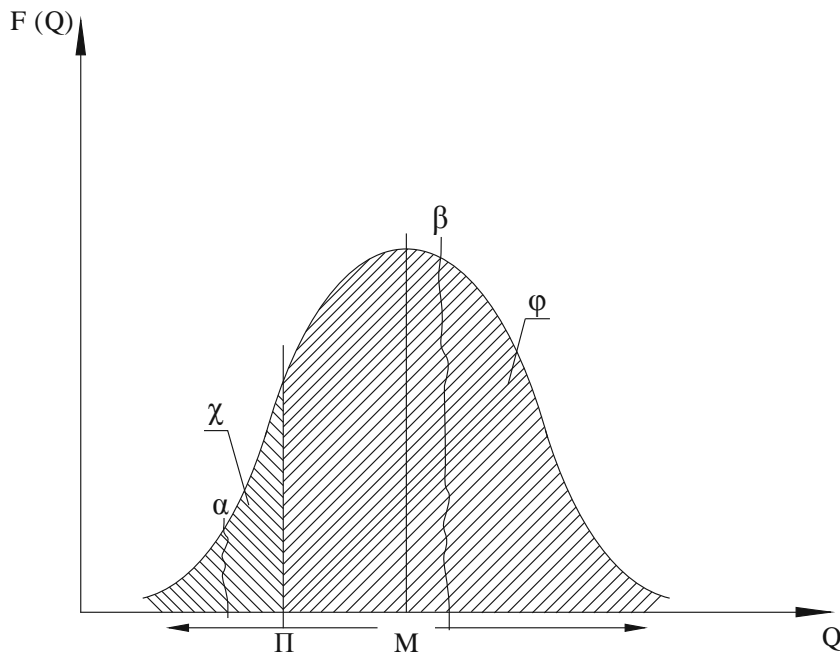


Рис. 3. Нормальний розподіл величини обсягів продажів

Якщо розподіл ймовірностей представлений окремими дискретними величинами (рис. 4), можна обчислити математичне очікування в секторі фігури нормального розподілу зліва від планового значення та справа, позначивши їх α і β відповідно. Відношення цих двох величин також може служити мірою ризику (формула 2).

$$R_2 = \frac{\alpha}{\beta}, \quad R'_2 = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (2)$$

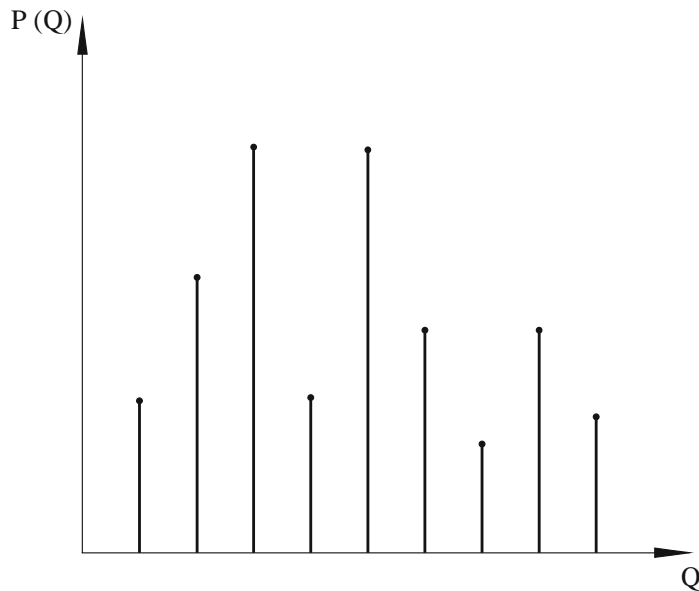


Рис. 4. Дискретний розподіл дискретної величини

У моделі Марковіца мірою ризику та ефекту диверсифікації прийнято середньо-квадратичне відхилення від прогнозної величини (σ). У разі ж виявлення ефекту зв'язаної диверсифікації портфеля господарської діяльності, зміна прогнозного значення (математичного сподівання) може не вплинути на значення σ . Але всі розглянуті вище показники по відношенню до зафіксованої величини плану (Π_1 на рис. 5) стають краще. Якщо ж план зміниться пропорційно зміні математичного сподівання (Π_3 на рис. 5), то рівень ризику залишиться тим самим, але підвищиться ефективність, тобто покращаться показники використання основних фондів та ін. Таким чином, можна говорити про зміну рівня ризику як про ефект диверсифікації, зниження ризику відбувається за рахунок збільшення прогнозних значень в наслідок комплексних продажів. Але, можливо і одночасне досягнення як ефекту диверсифікації, так і ефекту комбінування. Проте, нехтуючи ефектом диверсифікації, коли планове значення перевищує вже зміщене математичне очікування (Π_4 на рис. 5), можна отримати великий ефект комбінування, але ризик при цьому буде завеликий.

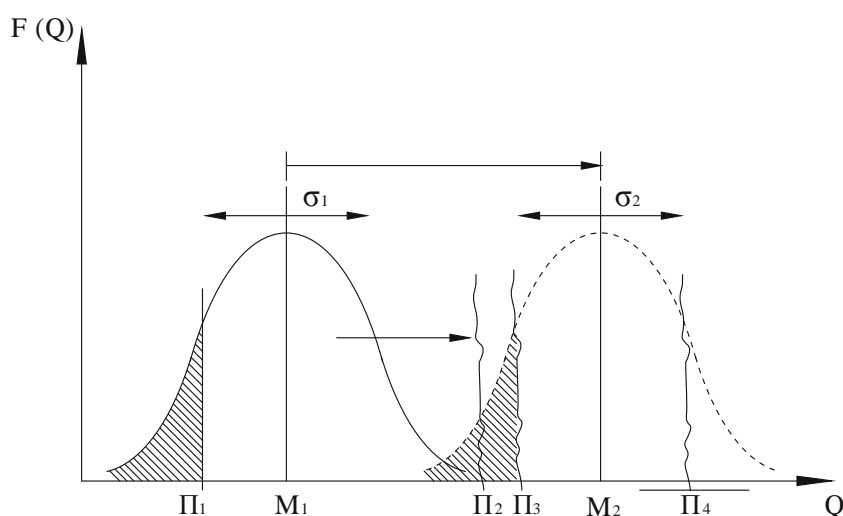


Рис. 5. Ефект диверсифікації виробництва у разі підвищення значення математичного сподівання обсягу реалізації

Показник співвідношення планових продажів з математичним сподіванням реалізації (K_B) не повною мірою можна віднести до коефіцієнтів ризику, але в теж час такий показник характеризує міру впевненості у досягненні планових обсягів реалізації, як власне і міра ризику, що прийнята в моделі Марковіца, але ж більшою мірою відповідає загальному поняттю ризику, бо значеннями такого показника суб'єкт характеризує заплановану власну дію, а не погляд на стан речей, у яких можливо й не збирається приймати участь (σ характеризує будь які події):

$$K_B = \frac{M[X]}{N_B}, \quad (3)$$

де K_B – коефіцієнт впевненості, $M[X]$ – математичне очікування обсягу продажів, N_B – плановий обсяг реалізації.

У моделі Марковіца ефект диверсифікації проявляється в зниженні сукупного ризику портфеля в результаті зміщення активів. У разі диверсифікації портфеля господарської діяльності виробничого підприємства підвищення сукупної впевненості в продажах відбувається в результаті чинника комплектності продажів, коли один з компонентів набору (товар) має найбільше математичне очікування продажів і тягне за собою підви-

щення впевненості в досягненні планового обсягу продажів кожного комплектного товару (компонента портфеля) окремо. Зміщення математичного сподівання обсягів продажів у бік збільшення позитивно відбиватиметься на значеннях K_B . В цьому випадку мірою ефекту диверсифікації (ЕД) може служити різниця значень коефіцієнта до диверсифікації та в разі диверсифікації:

$$ED = K_{e1} - K_{e2} . \quad (4)$$

Висновки та напрямки подальшого дослідження. Розрахунок ефекту диверсифікації за таким підходом більшою мірою відповідає поняттю ризику, ніж зниження невпевненості за Г. Марковіцем, та є адекватним умовам оцінки ефекту диверсифікації на виробничих підприємствах. Але отримані результати дослідження слід доповнити винаходом способу оцінки ефекту комбінування та сполучення його з ефектом диверсифікації.

Література

1. Кривуля П.В. Адаптація моделі Марковица к условиям формирования ассортимента продукции предприятия / П.В. Кривуля // Прометей. Региональный сб. науч. Трудов по экономике. Вып. 11. – Донецк: Юго-Восток, Лтд., 2003, – с. 246-253
2. Хозяйственный риск и методы его измерения / Бачкаи Т., Месена Д., Мико Д., Сеп Ё., Хусти Э. Пер. с венгер. К.Л. Горфана и Н.М. Озимка. – М.: Экономика, 1979. – 184 с.
3. Portfolio Selection. Harry Markowitz. The Journal of Finance, Vol. 7, No. 1. (Mar., 1952), pp. 77-91.

References

1. Krivulya P.V. Adapting the model to the conditions of formation of the Markowitz product range the company / PV Krivulya // Prometheus. Regional Sat scientific. Proceedings of the economy. No. 11. - Donetsk: South-East Co., Ltd., 2003, - p. 246-253.
2. Economic risks and methods of measurement / Bachkai T., Mesena D., Miko, D., Sepp E., Hust E. Trans. from Hungarian. K.L. Gorfana and N.M. Ozimka. - Moscow: Economics, 1979. – 184 p.
3. Portfolio Selection. Harry Markowitz. The Journal of Finance, Vol. 7, No. 1. (Mar., 1952), pp. 77-91.

Обоснована возможность и целесообразность использования подхода к оценке эффекта диверсификации, который использует более традиционные подходы к оценке уровня риска, но отличается от пихиду Г. Марковица и является более адекватным условиям госопдарювання производственных предприятий. Ист. 3.

Ключевые слова: *производственное предприятие, диверсификация, эффект диверсификации, комбинирование производств, риск.*

Studies the possibility and usefulness of the approach to assessing the effect of diversification, which uses a more traditional approaches to assessing risk level, but differs from pihidu H. Markowitz and is more adequate conditions hosopdaryuvannya manufacturing companies. Ref. 3.

Keywords: *Production Company, diversification, diversification effect, combining production, risk.*

Кривуля П. В. – к.е.н., доцент, докторант кафедри менеджменту та економічної безпеки Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ);

Дьоміна В. В. – здобувач кафедри менеджменту та економічної безпеки Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ).

Рецензент: Козаченко Г. В., д.е.н., завідувач кафедри менеджменту та економічної безпеки Східноукраїнського національного університету імені В. Даля (м. Луганськ).

КОНТЕНТ-АНАЛІЗ САЙТІВ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ, ЩО НАДАЮТЬ ОСВІТНІ ПОСЛУГИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГІЙ

В статті розглянуто досвід українських і російських освітянських закладів, що надають освітні послуги із використанням Інтернет-технологій, у створенні освітянського Веб-сайту. Розглянуто Веб-ресурси в якості інструменту для проведення маркетингової політики навчального закладу та інструменту для надання освітніх послуг з використанням Інтернет-технологій. Проведено контент-аналіз освітянських Веб-сайтів. Зроблено висновки і надано рекомендації щодо ефективного створення і використання сайтів освітянських установ. Дж. 12.

Ключові слова: інтернет-технології, контент-аналіз, навчальний заклад, освітні послуги, веб-сайт.

Постановка проблеми. Із затвердженням в Україні Указу Президента «Про заходи щодо розвитку національної складової глобальної інформаційної мережі Інтернет та забезпечення широкого доступу до цієї мережі в Україні» від 31 липня 2000 року №928/2000 і затвердженням постановою МОН України концепції розвитку дистанційної освіти в Україні, в нашій державі були створені нормативно-правові і законодавчі умови для впровадження нової форми освіти.

Однією з переваг новоствореної форми навчання є гнучкий графік і навчання у вільний час. За таких умов єдиним маркетинговим каналом освітянських установ виступає Інтернет, а сайт є основним маркетинговим інструментом. Основною ціллю освітньої організації є продаж якісних освітніх послуг. Тому сайт організації – її обличчя в інформаційному просторі – потребує особливо ретельного підходу під час його проектування і створення. Головне для користувачів – швидко знаходити потрібну інформацію, щоб сайт був зручним, цікавим, зрозумілим. В такому випадку представники цільової аудиторії стануть частими відвідувачами ресурсу, а згодом стануть клієнтами.

Сучасний стан дослідження проблеми. Незважаючи на значні зусилля розробників в галузі Веб-дизайну, багато сайтів мають проблеми у користуванні. При дослідженні сайтів електронної комерції виявляється, що лише 56 відсотків їх користувачів успішно пораються зі своїми завданнями [11]. За дослідженнями компанії Forester Research 65 відсотків всіх онлайн-покупок закінчується невдачею [12], а 40 відсотків відвідувачів вважають за краще не повертатися на сайт, зважаючи на негативний досвід взаємодії з сайтом [10, 9]. Користувачі не бажають вивчати особливості роботи з даним Веб-сайтом, не люблять повільних сайтів і громіздких інтерфейсів. Їм потрібен інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дасть можливість відразу після завантаження сторінки зручно взаємодіяти з ресурсом.

Мета дослідження. Нами було поставлено завдання здійснити дослідження практичного досвіду організацій, що надають освітні послуги із використанням Інтернет-технологій. Його мета – вивчення проблем та шляхів їх вирішення для ефективного застосування Інтернет-технологій в освітянських установах. Дослідження проведено на основі здійснення порівняльного контент-аналізу сайтів таких організацій. Кількість, якість і організація інформації на Веб-ресурсі установи дозволяють зробити висновок про рівень використання можливостей всесвітньої інформаційної мережі.

Основні матеріали дослідження. Завдання, які мають вирішувати організації, застосовуючи Веб-сайти, можна віднести до кількох напрямків.

По-перше, – це маркетинг, втіленням чого є функціонування сайту в якості маркетингового інструменту. Інтернет-маркетинг включає в себе такі елементи:

- Медійна реклама.
- Контекстна реклама.

- Пошуковий маркетинг або SEO-оптимізація. SEO-оптимізація (англ. search engine optimization – пошукова оптимізація) – комплекс заходів для підняття позиції сайту в результатах виконання запиту користувача інформаційно-пошуковими системами [1].

- Просування в соціальних мережах (англ. SMO – social media optimization).

- Прямий маркетинг. Наприклад, використання технологій електронної пошти, стрічок новин (англ. RSS) тощо.

- Паблік-рілейшнз.

- «Партизанський» маркетинг (англ. guerrilla marketing) – це малобюджетний вид маркетингу, який дозволяє досягати поставлених маркетингових цілей [6, с. 184]. Різновидом партизанського маркетингу є вірусний маркетинг – який має таку назву через характер розповсюдження інформації. Також часто вживається назва «сарафанне радіо» або WOM (англ. word-on-mouth) [8]. Із появою Web 2.0 і соціальних мереж даний вид маркетингу успішно там застосовується, оскільки у соціальних мережах ідеальні умови для розповсюдження реклами між представниками цільової аудиторії, які мають довірливі відносини між собою.

Використання телематики для маркетингових цілей означає активацію нового джерела інформації про діяльність освітянських установ для потенційних споживачів їх послуг, а також зниження поточних витрат на традиційні види реклами.

По-друге – організація навчального процесу через Інтернет, або Інтернет-логістика. Для здійснення електронних операцій на освітянському сайті необхідна реалізація системи логістики, яка враховує особливості взаємодії контрагентів з використанням Інтернет-технологій. Ця сфера діяльності називається Інтернет-логістикою. Термін “Інтернет-логістика” слід розуміти як “управління замовленнями, розподілом і доставкою продукції, сервісним обслуговуванням клієнтів”. Інтернет-логістика є “системою взаємодії між контрагентами на основі комп’ютера або іншого автоматизованого засобу з обміну інформацією” [2, с.45].

Оскільки цільовою аудиторією навчальних організацій, які надають освітні послуги із використанням Інтернет-технологій, є користувачі Інтернету, то логічно буде розглянути виключно ті сайти, які пересічний користувач може знайти засобами інформаційно-пошукових систем. Єдиним маркетинговим інструментом, задіяним під час взаємодії користувача з Інтернет-ресурсом, фактично є Веб-сайт. Тому надважливим є зовнішній вигляд Веб-ресурсу, зручність користування (юзабіліті) і компоненти, з яких він складається. Так склалося, що маючи підґрунтя у вигляді нормативно-правового законодавства, кожен навчальний заклад йде своїм шляхом у розвитку дистанційної освіти. Тому наше завдання полягає в аналізі існуючих освітніх Веб-ресурсів і розробці практичних рекомендацій щодо їх вдосконалення.

Дослідженнями торговельних Веб-ресурсів за методологією контент-аналізу займалася Ярова І.І. [7]. Ми використали її досвід і адаптували його до нашої проблематики, доповнивши групи і критерії оцінки.

Нами було досліджено п’ятнадцять Веб-ресурсів освітніх організацій України і двадцять – Росії (табл. 1). Російські Веб-сайти було долучено до аналізу через певну схожість тенденцій розвитку української та російської економік, спільне минуле та подібний шлях сучасного соціально-економічного розвитку. Також корисно, з аналітичної точки зору, розглянути досвід російських колег, оскільки Україна здебільшого повторює шлях й інформаційного розвитку Росії.

Т а б л и ц я 1

**Найбільш релевантні Веб-ресурси освітніх установ України і Росії
(з досліджуваних)**

№	Назва освітньої установи	URL ресурсу
<i>Веб-ресурси освітніх установ України</i>		
1	Міжрегіональна академія управління персоналом	http://www.maup.com.ua
2	Міжнародний науково-технічний університет	http://www.istu.edu.ua/
3	Українська інженерно-педагогічна академія	http://www.uipa.kharkov.ua
4	Хмельницький національний університет	http://dn.tup.km.ua

№	Назва освітньої установи	URL ресурсу
5	Український інститут інформаційних технологій в освіті. Національний Технічний Університет України "КПІ"	http://uiite.kpi.ua/
Веб-ресурси освітніх установ Російської Федерації		
1	Евразийский открытый институт	http://www.eoi.ru/
2	Московский государственный индустриальный университет (МГИУ)	http://vfmgiu.ru
3	Центр дистанционного обучения и заочного образования "Диомен"	http://www.diomen.ru/
4	Гуманитарно-экономический и информационно-технологический институт	http://www.geiti.ru/
5	Международный институт менеджмента ЛИНК	http://www.openlearning.ru/

Кожен із сайтів оцінювався за характеристиками двох виділених раніше напрямків.

Під час аналізу Веб-ресурсів нами було використано близько 110 критеріїв. Наведемо їх короткий перелік за найважливішими напрямками оцінки:

I. Маркетинг.

1. Інтернет-реклама.
2. Медійна або банерна реклама.
3. Прямий маркетинг: використання флеш-анімації; наявність новин організації, консультативних он-лайн служб, гарячої лінії, відеореклами (канал YouTube), випробувального демо-курсу тощо.

4. Паблік-рілейшнз: наявність короткого огляду «Про навчальний заклад», переваги, зв'язки з роботодавцями; наявність публікацій і відеосюжетів про навчальний заклад, що були опубліковані у різних ЗМІ.

5. Спонування до імпульсивних дій: наявність кнопки «Поступити зараз» та подібних, наявність цікавих пропозицій, акцій тощо.

6. Наявна інформація щодо освітянських послуг: наявність детального каталогу освітянських послуг і спеціальностей; наявність детального опису процесу навчання; наявність бізнес-освіти в якості освітніх послуг.

7. Використання системи електронної оплати освітянських послуг.

8. Взаємодія з відвідувачами і юзабіліті освітянського сайту: наявність іншомовних версій сайту; організовано пошук по сайту; можливість зв'язатися засобами e-mail, IP-телефонії та ін.; наявність зрозумілої цінової інформації; наявність особливих умов навчання для людей з обмеженими можливостями.

II. Організація навчального процесу (Інтернет-логістика).

9. Модель освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій.

10. Система дистанційної освіти: походження сайту СДО (власної розробки, безкоштовний або комерційний); технології, які використовуються для спілкування студентів і викладачів тощо.

11. Тип графіку роботи студента (стабільний, гнучкий, необмежений).

12. Форма представлення інформації.

13. Зв'язок навчального матеріалу з реальними проблемами.

14. Ключові слова в пошукових системах та контекстна реклама.

Тут нас цікавлять запити, пов'язані з Інтернет-технологіями в освіті – це, перш за все, «дистанційна освіта», та місце сторінки серед результатів.

Також серед критеріїв оцінювання є такі, що вимагають суб'єктивного оцінювання, за шкалою від 1 до 10: технологічна безпомилковість, ергономічність дизайну, перше враження, оцінка юзабіліті сайту.

Слід наголосити, що згідно законодавства Російської Федерації дистанційна освіта – це заочна освіта, що використовує технологію дистанційного навчання. Згідно українського законодавства дистанційна освіта – це самостійна форма навчання поряд з очною і заочною. Тому, на нашу думку, для опису моделей надання освітніх послуг доречніше використати термін «освітні послуги на базі Інтернет-технологій».

Вважаємо SEO-оптимізацію сайтів навчальних закладів одним з головних маркетингових інструментів, тому для пошуку потрібних нам Веб-ресурсів ми скористалися пошуковою системою Google. Для аналізу присутності Веб-сайту навчального закладу в Інтернеті ми користувалися інструментами Яндекс-Тематичний індекс цитування (ТІЦ) і Google PageRank. Тематичний індекс цитування визначає рівень поширеності Інтернет-ресурсів з урахуванням якісної характеристики посилань на них з інших сайтів [4]. Інструмент Google PageRank – ранг від 0 до 10, який відображає значущість Веб-сторінки.

Результати контент-аналізу свідчать, що поки російські освітянські сайти випереджають українські за всіма критеріями. Вони переважають і за якістю виконання, і за маркетинговою діяльністю, технологіями та ступенем розвитку освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій.

Слід звернути увагу на те, що усі досліджені російські й українські освітянські установи використовують свій сайт як сайт-візитку: на всіх ресурсах можна знайти контактні телефони і адресу. Проте схему проїзду до навчального закладу наведено на 75% російських ресурсів і лише на 56% українських. Інші показники в області Інтернет-реклами знаходяться на низькому рівні: майже не використовується поштове розсилання новин організації; тільки чверть російських ресурсів і третина українських мають можливість передплати за допомогою новинних каналів RSS. Отже, організації не використовують цілком потенціал Інтернету для роботи з цільовою аудиторією, і через відсутність зворотного зв'язку втрачають контакт з потенційними клієнтами.

Медійна реклама (або банерна) як інструмент підвищення рейтингу сайту, використовується на 7% українських ресурсів і 30% російських. На такому ж рівні знаходяться і пропозиції щодо партнерства. Рекламного банеру і його коду взагалі немає на жодному сайті. Тобто, власниками ресурсу мало уваги приділяється його розповсюдженню в мережі.

Дизайн-оформлення більшості ресурсів перебуває на низькому рівні. Сучасну флеш-технологію в створенні сайтів використовує менше ніж половина російських сайтів і четверта частина українських; на подібному рівні знаходиться використання навчальними закладами презентацій та відеореклами.

Негативним є той факт, що тільки половина українських сайтів надають інформацію про наявність гарячої лінії.

Наявність на освітньому порталі новин організації, що постійно інформують відвідувачів ресурсу про останні події в житті університету, студентів і науковій діяльності, позитивно впливає на імідж організації.

Результати дослідження. В результаті проведення контент-аналізу було виявлено, що переважна більшість російських проектів (55%) не інформує про перебіг процесу навчання з використанням Інтернет-технологій. Тобто клієнт купує продукт «наосліп», не знаючи, що отримає в результаті. В українському сегменті цей показник дорівнює 72%.

Також не всі освітні Веб-проекти містять відгуки випускників, інформацію про студентів, запитання та відповіді. Відсутній контакт з цільовою аудиторією, мало інформації, яка дійсно могла б зацікавити та привернути увагу абітурієнтів.

На українському ринку освітніх послуг тільки серед вищих навчальних закладів конкуренція досить велика (854 вищих навчальних закладів), не приймаючи до уваги приватні організації, які надають бізнес-освіту [3]. Тому надання інформації щодо переваг навчального закладу, місці, цілей, життя студентів у ВНЗ, після закінчення навчання, працевлаштування є надзвичайно важливим для цільової аудиторії. Наявність цієї інформації на російських сайтах дорівнює, в середньому, 60%, на українських – 25%.

В результаті проведення контент-аналізу було виявлено, що серед досліджуваних українських ресурсів жоден не використовував пошукову рекламу. Виключенням є Європейська школа кореспондентської освіти (ЄШКО), яка не є представником вітчизняних українських вузів. В той же час доля російських ресурсів в контекстній

рекламі систем Google і Яндекс займає 85% і 70% відповідно. Це суттєвий недолік, оскільки відсутня взаємодія сайтів із цільовою аудиторією.

Релевантність Веб-сайтів навчальних закладів досить низька. Якщо в російському сегменті перші дві сторінки пошукових систем заповнені адресами сайтів навчальних закладів, то в українському переважають інформаційні ресурси, які не є сторінками навчальних закладів. Разом із відсутністю контекстної реклами це дає можливість зробити висновок про те, що вагомий сегмент цільової аудиторії таких сайтів втрачений.

Більшість ресурсів як в російському сегменті, так і в українському, з незначною перевагою останніх, носять інформативний характер, виключаючи взаємодію з цільовою аудиторією, спонукання до дій. На більшості ресурсів досить важко знайти посилання на систему дистанційного навчання і кнопку «Поступити зараз». Здебільшого зв'язок відбувається через e-mail, що потребує багато часу для відповіді, і зацікавленість клієнта втрачається.

На ринку освітніх послуг поступово припиняє домінувати класична вища освіта. Дедалі більшою поширеністю користуються послуги, орієнтовані на бізнес. Це вебінари, майстер-класи, курси, тренінги, професійна перепідготовка тощо. Дані послуги відрізняються короткостроковістю, максимальним зв'язком із професійною діяльністю і вузькою спрямованістю. Випускники шкіл віддають перевагу традиційній очній та заочній освіті, а фінансові структури і бізнес-організації, розуміючи важливість професійного росту персоналу, створюють попит на нові форми навчання. Близько половини російських освітніх Веб-ресурсів надають вищенаведені види послуг. Серед українських навчальних закладів жоден їх не надає.

Серед ресурсів навчальних закладів майже повністю відсутня підтримка систем електронних грошей для оплати освітніх послуг. Тобто відсутні всі переваги придбання продукції через Інтернет.

За результатами контент-аналізу було виявлено, що взаємодія з відвідувачами і зручність користування ресурсом на російських сайтах також реалізована на кращому рівні, ніж на українських. Наявна більша кількість типів зв'язку – окрім традиційних телефонів і електронної пошти є можливість зв'язатися за допомогою IP-телефонії, Інтернет-месенджерів і чату. Близько сорока відсотків російських освітніх організацій користуються перевагами реклами в соціальних мережах і мікроблогінгу (Twitter), в українському сегменті цей показник нижчий – близько 20%.

Негативним є той факт, що тільки 60 % українських ресурсів містять цінну інформацію. Досить мало інформації про навчальний заклад. Жоден український ресурс не має власних підкастів, каналів на YouTube та подібних, які б інформували цільову аудиторію про діяльність навчального закладу. Також на більшості ресурсів погано зрозуміла навігація по сайту, що ускладнює пошук потрібної інформації і сприяє виникненню негативних емоцій під час взаємодії представника цільової аудиторії із сайтом навчального закладу.

В російському сегменті 60% організацій розміщують інформацію про публікації в ЗМІ, в українському – 13%. Даний момент негативно відображається на створенні позитивного іміджу освітньої організації і посиленні довіри до неї.

При проведенні контент-аналізу було виявлено, що серед українських і російських сайтів використовують СДО власної розробки 20% і 35% відповідно, безкоштовні – 67% і 40%. Комерційними продуктами користуються 15% російських навчальних закладів, серед українських таких виявлено не було. Більшість цих систем дають основні можливості для навчання: власний кабінет, дошка об'яв, залікова книжка, спілкування на форумах. Цього досить для підтримання процесу надання освітніх послуг з використанням Інтернет-технологій. Проте, наявність комерційних СДО і власної розробки свідчить про те, що навчальний заклад має стратегію надання освітніх Інтернет-послуг і використовує всі ті методи, які дадуть найкращий результат. Серед проаналізованих українських і російських ресурсів було виявлено, що для зв'язку суб'єктів навчальної діяльності IP-телефонію використовують 26% і 35% відповідно, Інтернет-месенджери – 33% і 35%, мікроблогінг – 6% і 30%, блог – 0% і 5%, соціальні

мережі – 6% і 30%, e-mail – 93% і 100%, форум – 66% і 85%. Отже, найпопулярнішими залишаються електронна пошта і форуми, які мають як переваги, так і недоліки. Третя частина навчальних закладів повідомляють, що використовують технології он-лайн спілкування. Тому процес навчання відбувається більш активно і продуктивно. Серед корисних інструментів для студентів також відсутні можливості накопичення досвіду і знань у вигляді ведення блогу та створення баз знань (Wiki-сторінки). Дані технології присутні у 10% російських сайтів і 6% українських.

Як було вже відзначено, поняття дистанційної освіти в Україні і РФ відрізняються. Проте багато вітчизняних вузів, які повідомляють, що надають дистанційну освіту, передбачають часті очні зустрічі, що більше схоже на заочно-дистанційне навчання, що нівелює переваги навчання через Інтернет.

Також нами були проаналізовані форми подання навчального матеріалу на освітянських сайтах. Серед досліджених 93% українських сайтів і 100% російських подають навчальний матеріал в текстовій формі, 13% і 65% з них відповідно мають електронні бібліотеки. Відеоматеріали використовують 20% і 40% сайтів, аудіоматеріали – 20% і 35%. Мультимедійні презентації використовують відповідно 13% і 30% сайтів, інтерактивну форму подання інформації – 20% і 25%. Також, 20% українських сайтів і 35% російських повідомляють, що їх навчальний матеріал має зв'язок з реальними професійними задачами і має оригінальну форму викладення.

Як було зазначено раніше, просунення сайту в пошукових системах має велике практичне значення, оскільки безпосередньо впливає на взаємодію з цільовою аудиторією. Якщо порівнювати роботу російських і українських організацій в цій сфері, очевидно, що останні взагалі не вдаються до пошукової реклами. Так, наявність ключових слів освітянських сайтів України і Росії в системі Google дорівнює 0% проти 80%, в Яндекс – 0% проти 65%. В середньому Яндекс-ТІЦ українських сайтів дорівнює 154 одиниць, російських – 214,25 одиниць; Google PageRank українських – 4,07 одиниць, російських – 4,3; зовнішні посилання в Яндекс – 291,73 одиниць проти 650 одиниць; зовнішні посилання в Google – 46,27 одиниць проти 54,5 одиниць. Не всі ресурси мають реєстрацію в тематичних освітянських каталогах, цей показник дорівнює 73% українських сайтів і 60% російських.

В цілому, проведений порівняльний аналіз освітянських сайтів виявив, що у російському сегменті Інтернет-ресурсів навчальних закладів спостерігається вищий рівень професіоналізму в оформленні і більш виражена орієнтація на освітні послуги із використанням Інтернет-технологій.

Середня оцінка «суб'єктивних» показників за підсумками проведеного нами контент-аналізу приведена на рис. 1. До групи «суб'єктивних» показників нами віднесено такі: технологічна безпомилковість реалізації сайту, ергономічність дизайну, юзабіліті і перше враження від сайту. Також на діаграмі представлений контрольний показник, задіяний для відображення максимальної оцінки сайту. Таку оцінку мають найкращі з розглянутих нами ресурсів освітянських закладів.

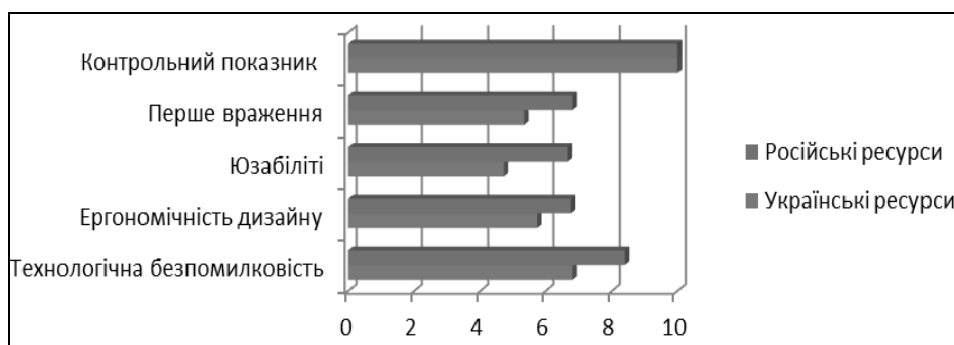


Рис. 1. Порівняльна характеристика контенту українських і російських освітянських сайтів за «суб'єктивними» показниками (авторська розробка)

Загалом російські сайти справляють позитивне враження, проте не всі. Так, перші позиції результатів пошукових запитів займають адреси сайтів навчальних закладів, які, притримуючись чіткої стратегії, мають високі показники по всіх позиціях. Проте, починаючи, з десятої позиції, ситуація змінюється, і сайти мають як непрофесійний дизайн, так і недостатнє інформаційне наповнення.

На жаль, поки Веб-ресурси української частини ринку освітніх послуг переважно більшістю являють непрофесійні сайти, виконані силами працівників самих навчальних закладів, які здебільшого є «звітністю з виконання роботи в сфері освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій», ніж мають реальну практичну цінність.

Враховуючи результати проведеного контент-аналізу і досвіду використання Інтернет-технологій при наданні освітніх послуг, можна виокремити фактори, що заважають розвитку українського ринку освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій:

- низький рівень інформатизації суспільства і освітнього процесу в порівнянні з розвиненими країнами. Рівень проникнення Інтернету в Україні дорівнює 33,9 % (відношення кількості користувачів Інтернету на душу населення) [5];
- відсутність професіоналів в навчальних закладах, що здатні реалізувати на вищому рівні освітянський Інтернет-проект;
- керівництво навчальних закладів не бере до уваги Інтернет як додатковий канал надання освітніх послуг і реклами;
- низька обізнаність суспільства щодо нових форм навчання;
- відсутність реальних дій з боку держави в напрямку підтримки навчальних закладів щодо розвитку нових форм навчання;
- неузгодженість плану дій по впровадженню нової форми навчання в навчальному закладі;
- недооцінка керівниками навчальних закладів ролі Інтернет-технологій в якості маркетингового каналу та в якості інструменту освітньої діяльності;
- сприйняття суспільством Інтернету в якості інформаційного ресурсу і джерела розваг, не усвідомлення його як потужного інструменту навчання та професійної діяльності.

Тому є необхідність створення ефективного організаційно-економічного механізму управління Інтернет-сайтами навчальних закладів, які включають теоретико-методологічні аспекти формування моделей надання освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій. Також є необхідність створення механізму вибору оптимальної моделі системи надання освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій.

Висновки та перспективи дослідження. Як свідчить досвід, нині практично всі вищі навчальні заклади присутні в Інтернеті. Але після проведеного контент-аналізу стає зрозумілим, що ця присутність є абсолютно неефективною, оскільки знайти користувачам цей сайт в Інтернеті майже неможливо. Тому інвестиції в цю галузь не виправдовують себе.

Було виявлено, що релевантність Веб-сайтів освітніх організацій, що надають освітні послуги із використанням Інтернет-технологій, знаходиться на низькому рівні (лише два результати на останніх місцях результатів пошукового запиту). Також виявлено, що дизайну і юзабіліті сайтів приділено мало уваги, через що вищі навчальні заклади втрачають представників цільової аудиторії.

Тому одним з першочергових завдань при створенні Веб-сайту є пошукова оптимізація і контекстна реклама, загалом – пошуковий маркетинг. Для досягнення цієї мети вбачаємо найдоцільнішим виокремлення структурного підрозділу навчального закладу, на який буде покладено відповідальність за створення і підтримку професійного Веб-сайту, пошукову і контекстну рекламу, пошукову оптимізацію, загальну підтримку надання освітніх послуг із використанням Інтернет-технологій.

Література

1. Ашманов И.С. Продвижение сайта в поисковых системах / И.С. Ашманов, А. А. Иванов. – М.: «Вильямс», 2007. – 304 с.
2. Бальбердин Е.В. Современные формы организации электронной коммерции в России: дис. канд. экон. наук: 08.00.05/ Е.В. Бальбердин. – М.: 2003. –151 с.
3. Сайт Державної служби статистики України. – http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/osv_rik/osv_u/vuz_u.html.
4. Овчинников Р. Корпоративный веб-сайт на 100%. Требуется от сайта больше! / Р. Овчинников, С. Сухов – СПб.: Питер, 2009. – 320 с.
5. Рівень проникнення Інтернету в країнах Європи. – Internet World Stats. – <http://www.internetworldstats.com/stats4.htm>.
6. Современный менеджмент: проблемы, гипотезы, исследования: Сб. докладов молодежной конференции / Гос. ун-т – Высшая школа экономики, ф-т менеджмента; науч. ред. М.Ю. Шерешева. – М.: Изд. дом гос. ун-та – Высшей школы экономики, 2010. – 376 с.
7. Ярова І.І. Управління просуванням товаропотоків підприємств засобами Інтернет-технологій: дис. канд. экон. наук: 08.00.04 / І.І. Ярова; Полтавський ун-т споживчої кооперації України. – Полтава: Полтавський ун-т споживчої кооперації України, 2008. – 222 арк.
8. Business Dictionary. Word of mouth marketing. – <http://www.businessdictionary.com/definition/word-of-mouth-marketing.html>.
9. Forester Research. Improving Web Usability Through Visualization. – <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.16.4368&rep=rep1&type=pdf>.
10. H. Manning, J.C. McCarthy, and R.K. Souza, "Why Most Web Sites Fail," whitepaper, Forrester Research, Cambridge, Mass., Sept. 1998.
11. J. Nielsen, "Did Poor Usability Kill E-Commerce?" Alert-box, 19 Aug. 2001; – <http://www.useit.com/alertbox/20010819.html>.
12. R. Souza et al., "The Best Of Retail Site Design," whitepaper, Forrester Research, Cambridge, Mass., Oct. 2000.

References

1. Ashmanov Y.S. Website promotion in search engines / Y.S. Ashmanov, AA Ivanov. - M.: "Williams", 2007. - 304 p.
2. Balyberdin EV Modern forms of e-commerce in Russia: dis. Candidate. Econ. Science: 08.00.05 / EV Balyberdin. - M.: 2003. – 151 p.
3. Site of the State Statistics Service of Ukraine. – http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/osv_rik/osv_u/vuz_u.html.
4. Ovchinnikov R. Corporate Web Site at 100%. Demand from the site for more! / R. Ovchinnikov, S. Sukhov - St. Petersburg.: Peter, 2009. - 320 p.
5. Internet penetration rate in Europe. - Internet World Stats. - <Http://www.internetworldstats.com/stats4.htm>.
6. Modern Man Management: Issues, hypotheses, research: Reports of the Youth Conference / State. University Press - High School of Economy, Faculty of Management, Scien. yet. MY Sheresheva. - Moscow: Izd. home state. Zap – High school of Economy, 2010. - 376 p.
7. Yarova II Promotion of enterprise commodity management tools Internet technologies: dis. Candidate. Econ. Sciences: 08.00.04 / II Yarova; Poltava University of Consumer Cooperatives in Ukraine. - Poltava, 2008. - 222 p.

В статье рассмотрен опыт украинских и российских учебных учреждений, предоставляющих образовательные услуги с использованием Интернет-технологий, посредством создания образовательного Веб-сайта. Рассмотрены Веб-ресурсы в качестве инструмента для проведения маркетинговой политики учебного заведения и инструмента для предоставления образовательных услуг с использованием Интернет-технологий. Проведен контент-анализ образовательных Веб-сайтов. Сделаны выводы и даны рекомендации по эффективному созданию и использованию сайтов образовательных учреждений. Дж. 12.

Ключевые слова: дистанционное обучение, Интернет-технологии, Интернет-логистика, контент-анализ, маркетинговые инструменты, учебное заведение, образовательные услуги, веб-сайт.

The article reviews the experience of Ukrainian and Russian educational institutions that provide educational services using Internet technology, by creating educational Web site. Considered Web resources as a tool for marketing education and tools to provide educational services using Internet tech-

nologies. A content analysis of educational Web sites. The conclusion and the recommendations on the effective creation and use of educational institutions websites. Ref. 12.

Keywords: distance learning, Internet technologies, Internet logistics, content analysis, marketing tools, school, educational services, web site.

Лавренюк Руслан Миколайович, асистент кафедри інформаційної діяльності в економічних системах ВНЗ Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі» (м. Полтава).

Рецензент: Макарова М. В., д.е.н., проф., завідувача кафедри інформаційної діяльності в економічних системах ВНЗ Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі» (м. Полтава).

УДК 338.439.434

Є.І. Чернявська

м. Луганськ

РЕСТРУКТУРИЗАЦІЯ ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ: АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ.

Розглянуто сутність реструктуризації в контексті перетворення підприємств у суб'єкти ринкової економіки. Визначено актуальні напрями реструктуризації підприємств харчової промисловості на сучасному етапі ринкових реформ.

Ключові слова: харчова промисловість, підприємство, реструктуризація, монополістична конкуренція.

Постановка проблеми. Перехід до ринкових відносин зумовив істотні зміни на підприємствах харчової промисловості. Але поряд з позитивними змінами ринкові реформи принесли і негативні наслідки, вагомими з котрих є скорочення обсягів виробництва та падіння якості продукції, стихійне розукрупнення підприємств, зростання рівня зносу виробничих фондів та ін. В харчовій промисловості активно проводиться реструктуризація підприємств. Однак здійснені міри поки що бажаного результату не дали. Галузь не являється конкурентоспроможною. Це зумовлює необхідність теоретичних досліджень, визначення сутності та форм або напрямів реструктуризації підприємств як умови їх ефективного пристосування до ринкових відносин.

Аналіз публікацій. У більшості економічних праць, на законодавчому рівні, у практиці реформування реструктуризація розглядається головним чином в контексті неокласичної теорії, яка розглядає підприємство з точки зору виробничої функції. Поза рамками аналізу залишаються соціально-економічні проблеми перетворення підприємств у суб'єкти ринкової економіки, специфіка їх функціонування відповідно до пануючих сьогодні ринків недосконалої конкуренції.

Метою статті є розгляд реструктуризації підприємства в контексті становлення ринкової економічної системи, перетворення підприємств недосконалої конкуренції у суб'єкти ринкової економіки, визначення актуальних напрямів її здійснення відносно підприємств харчової промисловості на сучасному етапі ринкових реформ.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Реструктуризацію в загальному плані можна визначити як структурну перебудову. Реструктуризація може торкатися підприємств, галузей, кластерів, регіональної та національної економік. Ефективність реструктуризації чинним зразком залежить від врахування в її процесах соціальної специфіки економічної системи, її розвитку, закономірностей переходу від однієї економічної системи до іншої. За своєю сутністю ринкові реформи повинні бути націлені на становлення нової системи виробничих відносин та їх інституціоналізації як умови розвитку продуктивних сил, «розкріпаченню» підприємницьких здібностей людини, підприємств. Головний зміст реформ звівся до проблем приватизації суспільної власності на засоби виробництва та створення на цій основі

прошарку приватних власників. В результаті реформи принесли більше проблем, негативу, ніж позитиву. В силу цього проблеми економічного реформування зберігають своє значення і потребують в процесах реструктуризації врахування саме соціальної специфіки розвитку економічної системи.

Оскільки основу економічної системи складає підприємство як організаційна форма виробництва, то важливіше значення у становленні нового типу економічної системи, ринкової має реструктуризація підприємств колишньої системи. Концепція або модель реструктуризації підприємства повинна зумовити перетворення підприємства, що формувалося і діяло на основі планових принципів, у ефективні суб'єкти ринку. Особливе значення проведення реструктуризації та вирішення проблем конкурентоспроможності має для підприємств харчової промисловості.

Продукція підприємств харчової промисловості має соціальне значення. При чому якість продукції суттєво впливає на здоров'я людей та тривалість життя. Ціни безпосередньо впливають на вибір споживачами продуктів харчування. Ціни, за якими підприємства харчової промисловості можуть реалізовувати свою продукцію, впливає на вибір ними сировини, компонентів, із чого виготовляється продукція. Розвиток харчової промисловості також має велике значення для національної безпеки. Сьогодні стан підприємств харчової промисловості потребує подальшого реформування з метою перетворення у сучасні суб'єкти ринку, тобто конкурентоспроможні.

У харчовій промисловості України діють 2000 підприємств (30 галузей), її частка в колишньому Союзі становила 23%. За попередній період ринкових реформ обсяги виробництва скоротилися на 40-50%. Існуючі технології і застаріле обладнання не забезпечують конкурентоспроможності продукції. Фондозабезпеченість одного робітника менша, ніж у Франції, у 180, Австрії - у 136 разів. У західних країнах частка харчової промисловості у структурі АПК 60-70%, в Україні - лише 25-30% [1]. Рівень зносу фондів промисловості досягає 45—50%. Продуктивність праці в даному секторі промисловості у 4-5 разів нижча, ніж у розвинутих країнах, рівень механізації праці на харчових підприємствах становить близько 50-60%. Майже половину технологічного устаткування, встановленого в переробній сфері, потрібно замінити, і близько чверті — модернізувати. Світовим стандартам відповідає лише 15% активної частини основних виробничих фондів, частка механізованих ліній становить лише 8% від діючого устаткування [2, с. 35].

Вирішення проблеми перетворення підприємств харчової промисловості у конкурентоспроможні суб'єкти сучасного ринку актуальне і можливе за умов врахування специфіки ринкової та планових економік, закономірностей становлення підприємств як суб'єктів ринкової економіки.

Ринкову економіку можна розглядати на рівні загальних положень. В такому разі необхідно відзначити наступне. Ринкова економіка – це система суспільного господарювання, при котрій виробництвом продукції займаються окремі, самостійні товаровиробники. Продукція виготовляється для споживачів, до яких вона поступає через ринковий механізм продажу-купівлі. Товаровиробники у виборі виду економічної діяльності керуються власними інтересами (отримання прибутку), виробництво ведуть на свій страх та ризик, за власні кошти. Успіх товаровиробників, підприємств залежить виключно від реалізації продукції.

В умовах капіталістичного товарного виробництва товаром стає робоча сила, а товарна форма виробництва набуває рис пануючої форми господарювання. Ринкові відносини стають пануючою формою зв'язків між товаровиробниками і споживачами, між різниками суб'єктами підприємницької діяльності.

Ринкова економіка може мати в основі свого розвитку різний тип конкуренції. За цим критерієм розрізняють ринкову економіку вільної конкуренції і ринкову економіку, коли пануючою формою структури ринку є недосконала конкуренція. Зміни у типі конкуренції пов'язані зі змінами на рівні суб'єктів господарювання. Процеси концентрації та централізації капіталу в формі акціонерних товариств під дією II промислової революції закономірно зумовлюють появу та розвиток у промисловості монополістичних

підприємств (акціонерних товариств відкритого типу або корпорацій), котрі вносять зміни у ринковий механізм регулювання економіки.

Монополістичні підприємства володіють конкурентними перевагами, які полягають в тім, що концентрація виробництва і капіталу дозволяє їм регулювати ринкові ціни і отримувати від цього монополістичні прибутки. З метою недопущення недобросовісної конкуренції, отримання прибутків через розподільчі та перерозподільні механізми наприкінці XIX - початку XX ст. в різних країнах були прийняті та введені в дію анти-трестовські закони. Вони були підпорядковані обмеженню ринкової влади монополій, що стало і стимулом до розвитку ними науково-технічного прогресу, удосконалення організації праці та управління і отримання на підставі цього монополістичних прибутків.

Радянська економіка також була монополістичною. Монополістичність дозволяє більш ефективно здійснювати управління командними або адміністративними методами. Орієнтованість на виконання розпоряджень державних органів формувала структуру монополій, їх багатогалузевий, а не міжгалузевий характер. Розвиток монополій спирався на державні капіталовкладення.

При визначенні процесів ринкового реформування, однією із форм котрого є реструктуризація підприємств, необхідно враховувати інституціональні та структурні параметри, за якими працюють західні ринки недосконалої конкуренції та монополістичні утворення. Заміна суспільної форми власності на приватну, безперечно, як і наймана праця (це погано усвідомлюється як на державному рівні, так і рівні самостійних підприємств) складають основу розвитку ринкової економіки. Але сучасна ринкова економіка, як відмічалось, - це ринкова економіка з пануванням ринків недосконалої конкуренції, яка для ефективного розвитку потребує регуляторних функцій держави.

Недосконала конкуренція може виступати в різних формах: монополії, олігополії, монополістичної конкуренції, моносонії. За формами число учасників (товаровиробників) є різним, але в будь-якому разі обмеженим. Це дозволяє прогнозувати ринкову кон'юнктуру, розвиток виробництва та підприємств. Майкл Портер в своїй концепції конкурентоспроможності показав це. Ринки харчової промисловості, як правило, носять регіональний характер, це ще більше спрощує проблеми визначення параметрів розвитку ринків продовольства та підприємств, як їх учасників. До того ж більшість підприємств мають короткий цикл виробництва, що з економічної точки зору робить ринок інвестицій привабливим для підприємств харчової промисловості.

Таким чином, сучасні проблеми реструктуризації підприємств як умови перетворення їх у конкурентоспроможні суб'єкти ринку пов'язані з вирішенням питань не економічного, а соціально-економічного характеру. Актуальні напрями реструктуризації підприємств харчової промисловості на сучасному етапі ринкових реформ пов'язані з вирішенням у країні наступних питань.

1. Необхідно признати, що ефективний розвиток економіки в сучасних умовах науково-технічного прогресу потребує різних форм власності. В умовах ринкової економіки з домінуючим характером приватної власності важливу роль відіграє і державна власність на засоби виробництва. Державні кошти (котрі мали би головним чином форму гаранту) одночасно з коштами населення, власними коштами підприємства могли би створити інвестиційну основу для модернізації основних фондів підприємств харчової промисловості.

2. Розмежування бізнесу і влади. Мова не йде про формальні критерії розмежування. Сучасна ринкова економіка передбачає активну роль держави. Вона стає одним із суб'єктів ринкової економіки. В такому разі державні службовці, що очолюють державні економічні інститути, повинні нести відповідальність за результати економічної діяльності. Для вищих посадових осіб за аналогією розвинутих країн такими показниками повинні бути, наприклад, темпи економічного зростання, виробництво ВВП на 1 особу, рівень зайнятості, індекс цін або інфляції. Реальна відповідальність вищих посадових осіб за результати праці перш за все стане антикорупційним фактором, розкрадання коштів державного бюджету та активізує підприємницьку діяльність держави відповідно до сучасних особливостей ринкової економіки.

3. Капітальні вкладення. Без вирішення проблеми інвестицій в розвиток підприємств неможливо вирішити питання їх ефективності як суб'єктів ринку. Забезпечення конкурентоспроможного рівня підприємств неможливе без постійного удосконалення технічної основи підприємства. Для цього потрібні інвестиційні ресурси. Джерелом цих ресурсів можуть бути власні ресурси (прибуток), кошти ринку цінних паперів, кредитні ресурси, а також кошти державного бюджету. Оскільки підприємства ринків недосконалої конкуренції – це акціонерні товариства, головним чином, відкритого типу, то головним джерелом інвестиційних ресурсів повинні бути капітали ринку цінних паперів. А це пов'язано з відповідною нормативною (законодавчою) базою, чого в необхіднім обсязі не має та самими капіталами, чого також не має. Тому держава також повинна стати інвестором, але за правилами ринкової економіки.

4. Обмеження монополізму. Монополія, як відомо, має подвійний характер. З одного боку, вона є організаційною формою розвитку продуктивних сил, виробництва, а, з другого – володіє можливостями регулювати ринкові ціни таким чином, щоб отримувати надприбутки. Юлія Тимошенко неодноразово заявляла, що доларові мільйонери і мільярди в Україні зростають на газовій трубі. Саме на запобігання збагачуватися за рахунок широких прошарків населення в розвинутих країнах були прийняті антитрестовські закони. В Україні прийнято Закони України «Про Антимонопольний комітет України», «Про обмеження монополізму та недопущення недобросовісної конкуренції в підприємницькій діяльності», «Про захист від недобросовісної конкуренції». Але закони є малоефективними і фактично не обмежують владу монополій. Особливо негативну роль в економіці підприємств харчової промисловості, як і інших, відіграють паливно-енергетичні монополії. Використовуючи корупційні механізми, вони суттєво завищують ціни на паливно-енергетичні продукти, привласнюючи таким чином частину прибутків підприємств, що і зумовлює низький рівень рентабельності багатьох підприємств харчової промисловості.

До того ж монополізм виключає «...чесну конкуренцію роботодавців по відношенню залучення кваліфікованої робочої сили, обмежує вибір щодо працевлаштування, створює можливості для штучного зниження заробітної плати» [3], обмежуючи таким платоспроможний попит ринку.

5. Перехід від однієї господарської системи до іншої, в даному разі до ринкової, має об'єктивне підґрунтя. Перехід є умовою подальшого розвитку продуктивних сил, підвищення ефективності виробництва, підвищення якості трудового життя та зростання добробуту населення. Зростаючий добробут найманих працівників за цих обставин перетворюється у мотиваційний стимул до підвищення кваліфікації та продуктивності праці. Зростання добробуту у ринковій економіці має перш за все грошову форму і відбувається у зростанні реальної заробітної плати, та доходів населення, що в свою чергу стимулює розвиток підприємницької діяльності, підприємств.

Перехід до ринкової економіки в Україні зумовив падіння реальної заробітної плати, що значно зменшило ємність національного ринку, його якість. За офіційною статистикою відразу після початку процесу ринкових реформ грошові доходи середньої української родини зменшилися майже на 60 %, що за світовими стандартами є надзвичайним явищем. Значна частина людей стали бідними. Основною ознакою «української бідності» стало те, що бідність стала проблемою працюючих. За даними обстеження домогосподарств в 2005 році розподіл населення за основними соціальними групами свідчить про те. Що в групі з найменшими витратами частка працюючих становить 37,5 %, тоді як частка непрацюючих пенсіонерів – 14,0 %; дітей до 18 років – 31,9 %; студентів – 2,1 %; інших – 14,5 %. Загалом, більше половини працюючого населення (50,8 %) мали сукупні середньодушові доходи нижчі за прожитковий мінімум [3].

Висновки. В загальному плані реструктуризація підприємства – це його структурна перебудова. Трансформація командно-адміністративної системи в ринкову економіку обумовлює соціально-економічний зміст реструктуризації підприємств, перетворення їх у конкурентоспроможні структури сучасного ринку. Актуальними напрямками реструктуризації підприємств харчової промисловості є розширення ємності національного ринку за рахунок зростання заробітних плат та доходів населення, формування ринків

інвестицій, що в свою чергу пов'язано з вирішенням питань розмежування бізнесу і влади та обмеженням монополізму і корупції.

Література

1. Харчова промисловість як основа забезпечення продовольчих потреб людини і суспільства. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://pda.coolreferat.com/>
2. Федюніна С.Д Про перспективи розвитку харчової промисловості України // Економіка АПК. – 2000. - № 12. – С. 35-37.
3. Україна. Подолання бідності. [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.undp.org.ua/files/ua_24267mdgp.pdf

References

1. Harchova promislovisht' jak osnova zabezpechennja prodovol'chih potreb ljudini i suspil'stva. [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu: <http://pda.coolreferat.com/>
2. Fedjunina S.D Pro perspektivi rozvitku harchovoї promislovosti Ukraїni // Ekonomika APK. – 2000. - № 12. – S. 35-37.
3. Ukraїna. Podolannja bidnosti. [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu: www.undp.org.ua/files/ua_24267mdgp.pdf

Чернявская Е.И.

РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Рассмотрена сущность реструктуризации в контексте превращения предприятий в субъекты рыночной экономики. Определены актуальные направления реструктуризации предприятий пищевой промышленности на современном этапе рыночных реформ.

Ключевые слова: пищевая промышленность, предприятие, реструктуризация, монополистическая конкуренция.

Cherniavska Ye.I.

RESTRUCTURING OF FOOD INDASTRI ENTERPRESES: TOPICAL QUESTIONS

The paper considers the main point of restructuring in the context of conversion of enterprises into market economy entities. The paper also determines the topical trends of restructuring of food industry enterprises at the present stage of market reforms.

Key words: food industry, enterprise, restructuring, monopolistic competition.

Чернявская Евгения Ивановна – д.э.н., проф. кафедры управления персоналом и экономической теории Восточноевропейского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

УДК 658.7

Т.В. Щолокова

м. Луганськ

АНАЛІЗ РИЗИКІВ В УНІВЕРСАЛЬНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ДИВЕРСИФІКОВАНИМ РИНКОМ ЗБУТУ. ЧАСТИНА 1.

В роботі сформульован аналітико-графічний апарат кількісної оцінки ризиків, пов'язаних з функціонуванням глобальних ланцюгів фінансово-виробничих відносин з диверсифікованим ринком збуту. Дан подальший розвиток методів реінжинірингу універсальних логістичних систем як адаптивного регулятора у конкурентному середовищі. Дж. 2.

Ключові слова: логістика, реінжиніринг, закон продажів, TVS – методологія, логістичні затрати.

1. Вступ. Згідно з аксіомою А1 аксіоматичної теорії економічного аналізу (АТЕА) [1], світова економічна система (СЕС) – це диз'юнктивна сукупність простих та розгалужених ланцюгів фінансово-виробничих відносин, які представляють собою консервативні структури функціонально зорієнтовані на виробництво деякого виду продукції. В умовах глобалізації світової економіки та існування єдиного ринку конкурентна ситуація

з'являється тоді, коли на глобальному ринку починають діяти не менше двох універсальних логістичних систем (УЛС) з однаковою діаграмою локального ланцюга фінансово-виробничих відносин (д.л.л. ФВВ) типу

$$B \xrightarrow{Y} A \xrightarrow{X} C, \quad (1)$$

де суб'єкти господарської діяльності В, А та С означають відповідно підприємство-постачальника сировини Y , підприємство-виробника продукції X , що виготовляється частково або повністю із сировини Y , та ринок збуту продукції X (тут і подальше використовуються символи і означення роботи [1]).

Конкуренція між цими універсальними логістичними системами потребує використання методів реінжинірингу в межах відповідних постачальницько-виробничо-розподільчих структур з метою посилення синергетичного ефекту і зменшення логістичних затрат, що в кінцевому рахунку суттєво вплине на розмір доданої вартості та собівартості основної продукції X . Але не зважаючи на те, що прості і розгалужені глобальні ланцюги фінансово-виробничих відносин (п.г.л. ФВВ і р.г.л. ФВВ) обслуговують, як правило, сталий попит, існує імовірність в умовах конкуренції та форс-мажорних обставин втрати деякої частини ринку, що можна кваліфікувати як ризики функціонування УЛС в ланці вида

$$A \xrightarrow{X} C. \quad (2)$$

Маючи на увазі структурну організацію УЛС [1], легко виписати перелік компонент, які містить в собі система логістичних ризиків (ЛР):

ЛР1. Конкурентна зміна макропараметрів M і T закону продажів (ЗПР) $P(t)$, $t \geq 0$, де M означає оптимальний запас сировини, а T – час обертання запасів, $M = P(T)$, в бік зменшення параметра M до \bar{M} і, можливо, збільшення параметра T до \bar{T} , $\bar{M} = \bar{P}(\bar{T})$, яка вимірюється величиною

$$\Delta(M, M_1) = (M - M_1) / M \cdot 100\%, \quad (3)$$

долею у відсотках втрати ринку за період T , $M_1 = \bar{P}(T)$ (рис.1).

ЛР2. Форс-мажорне зниження рівня функціональності в ланці вида $\{A * B_{k+1}, A * B_k\}$, що визначається символом $\xrightarrow{Y_{k+1}} A * B_k \xrightarrow{Y_k}$, тобто, перетворення сировини із стану Y_{k+1} в стан Y_k раптово припиняється або відбувається в обсягах, які не відповідають M – представленню індикатора продукції X стосовно сировини Y , $M - R(\text{ind } X/Y)_{\text{tec}} = \{M_n, M_{n-1}, \dots, M, m(X)\}$

ЛР3. Форс мажорна зміна ЗПР $P(t)$.

ЛР4. Якісна модифікація максимального технологічного розширення л.л.ФВВ (1), яка супроводжується комплексним реінжинірингом усього г.л.ФВВ.

ЛР5. Раптова припинка діяльності посередників (інвесторів) у деяких ланках типу

$$\xrightarrow{Y_{p+1}'} C * B_p \xrightarrow{Y_{p+1}'}$$

Треба відмітити, що у теоретичних розробках сучасних економічних шкіл як іноземних, так і вітчизняних, відсутній концептуальний підхід до кількісного аналізу логістичних ризиків у діяльності глобальних ланцюгів фінансово-виробничих відносин [2]. Отже, ця тематика є актуальною і потребує відповідного дослідження.

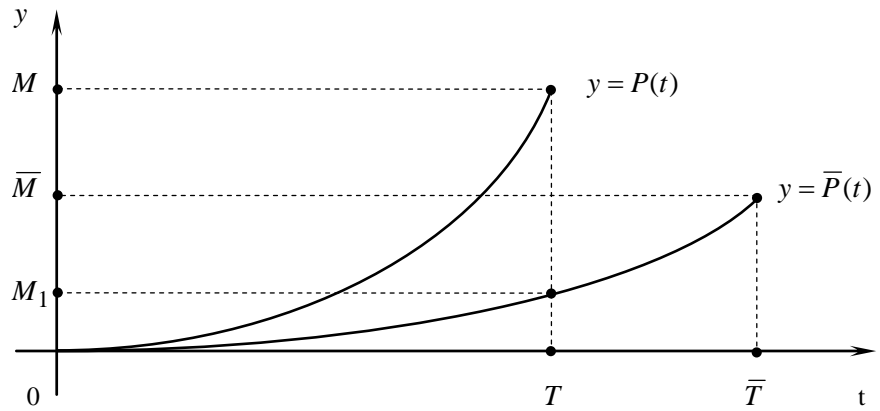


Рис.1. Графіки законів продажів: первісного $y = P(t)$, $0 \leq t \leq T$, та наступного $y = \bar{P}(t)$, $0 \leq t \leq \bar{T}$ в умовах конкурентної зміни кон'юнктури ринку збуту, $\bar{M} < M$, $\bar{T} > T$.

2. Формування проблеми. В даній роботі буде приведена розширена трактовка першої з п'яти компонент ризиків, які визначені раніше у попередньому пункті. Більш детальніше формулювання проблеми міститься в наступному. Нехай економічний реєстраційний сертифікат ERC1 деякого п.г.л. ФВВ має вигляд, відображений у табл. 1, в якій використовуються загальні характеристики відповідних параметрів.

Т а б л и ц я 1

Економічний реєстраційний сертифікат ERC1

ERC1			
Економічний реєстраційний сертифікат простого глобального ланцюга фінансово-виробничих відносин			
№	Виробнича специфікація		
	Умовна позначка	Назва	Опис
1	X	Вироблена продукція	Загальний характер
2	Y	Використана сировина	Загальний характер
3	$n_{tec}(Y)$	Технологічний параметр	n
3.1	Y_n	n -а ступінь	Загальний характер
...
3.n	Y_1	Перша ступінь	Загальний характер
4.	$ind \frac{X}{Y}$	Індикатор продукції	$\{Y'_p, \dots, Y'_1, Y, X\}$
4.1	Y'_p	p -ий етап	Загальний характер
...
4.p	Y'_1	Перший етап	Загальний характер

Згідно табл.1 випишемо у явній формі максимальне технологічне розширення та діаграму комерційного розширення л.л. ФВВ (1):

$$\{B_n, A * B_{n-1}, \dots, A * B_1, A * B, A, C\}, \quad (4)$$

$$B_p \xrightarrow{Y'_p} \dots \xrightarrow{Y'_{i+1}} A * B_i \xrightarrow{Y'_i} \dots \xrightarrow{Y'_{j+1}} C * B_j \xrightarrow{Y'_j} \dots \xrightarrow{Y} A \xrightarrow{X} C. \quad (5)$$

Базові параметри п.г.л. ФВВ (4) приведені у табл. 2.

Зазначимо, що у п.г.л. ФВВ (5) діє закон продажів $y = P(t)$ (рис.1), який характеризується початковими параметрами M і T . У зв'язку з чим, M - представлення та α - представлення індикатора продукції X при максимальному технологічному розширенні (4) мають відповідно вигляд

$$M - R\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)_{tec} = \{M_n, M_{n-1}, \dots, M_1, M, m(X)\}, \quad (6)$$

$$\alpha - R\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)_{tec} = \{\alpha(n), \alpha(n-1), \dots, \alpha(1), \alpha(0)\}, \quad (7)$$

а при комерційному розширенні (4) - вигляд

$$M - R\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)_{com} = \{M'_p, M'_{p-1}, \dots, M'_1, M, m(X)\}, \quad (8)$$

$$\alpha - R\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)_{com} = \{\alpha'(p), \alpha'(p-1), \dots, \alpha'(1), \alpha'(0)\}, \quad (9)$$

Т а б л и ц я 2

Економічний реєстраційний сертифікат ERC3

ERC3			
Економічний реєстраційний сертифікат простого глобального ланцюга фінансово-виробничих відносин			
№	Виробнича специфікація		
	Умовна позначка	Назва	Значення
1	$f_{tec}\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)$	Фактор індикатора максимального технологічного розширення	$n + 1$
2	$f_{com}\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)$	Фактор індикатора комерційного розширення	$p + 1$
3	N_{tec}	Обсяг максимального технологічного розширення	$f_{tec} + 1$
4	N_{com}	Обсяг комерційного розширення	$f_{com} + 1$
5	N_c	Рівень комерціалізації	$N_{com} - N_{tec}$
6	χ	Ступінь комерціалізації	$\frac{N_c}{N_{com}}$
7	r	Коефіцієнт нестабільності	$\frac{N_c}{N_{tec}}$
8	k	Коефіцієнт конкурентоздатності	$\frac{N_{tec}}{N_c}$

У співвідношеннях (7) і (9) коефіцієнт переходу $\alpha(0)$ та $\alpha'(0)$ визначаються рівністю

$$\alpha(0) = \alpha'(0) = \frac{M}{m(X)}. \quad (10)$$

Потужність ривайвінгу п.г.л. ФВВ (5) дається величиною

$$\lambda_{rev} = \frac{f_{tec}(\text{ind } X/Y)}{N_{com}} = \frac{n_{tec}(Y)+1}{f_{com}(\text{ind } X/Y)+1}. \quad (11)$$

Далі, нехай C'_k , $k=0,1,2,\dots, p$ - собівартість одиниці сировини в стані k , що відповідає її кількості M'_k , а C_x - собівартість одиниці основної продукції з урахуванням тільки компоненти Y . Тоді додану вартість на кожному етапі перетворення сировини можна визначити рівністю

$$\begin{cases} \Delta C'_{k-1} = C'_{k-1} - \frac{M'_k}{M'_{k-1}} C'_k, & k=1,2,\dots, p, \\ C'_0 = C_0, \end{cases} \quad (12)$$

а у елементарній структурі $Y \rightarrow A \xrightarrow{X}$ - рівністю

$$\Delta C_x = C_x - \frac{M}{m(X)} C_0. \quad (13)$$

В подальшому дослідженні будемо дотримуватися інформації, яка міститься у табл.3. [1].

Вирази, співвідношення, рівності (3) – (13), а також табл. 1-3 треба розглядати як основу аналітико-графічного апарату кількісної оцінки ризиків, пов'язаних з функціонуванням простого глобального ланцюга фінансово-виробничих відносин, використовуючи при цьому TVS-методологію з метою його реінжинірингу.

3. Результати дослідження. В цьому пункті будемо виходити з припущення, що диверсифікаційні тенденції глобального ринку збуту в умовах ефективної маркетингової політики у п.г.л.ФВВ (5) мають прогнозований характер і, таким чином, виникає можливість кількісної оцінки логістичного ризику зміни закону продажів $y = P(t)$ на $y = \bar{P}(t)$ (рис.1). При цьому надо мати на увазі, що функціонуванні п.г.л. ФВВ (5) у режимі діючого ЗПР $y = P(t)$ припиняється по виробництву в момент часу $t = mT$, $m \in \mathbb{N}$ з послідуною реалізацією продукції X у кількості M на протязі часу $[mT, (m+1)T]$ (рис.2), а виробництво продукції X у кількості \bar{M} з новим ЗПР $y = \bar{P}(t)$ починається в той же момент часу $t = mT$, що обумовлює модифікацію M - та α - представлень індикатора продукції X відповідно (4) та (5), пов'язаною з заміною величини M на \bar{M} . Рівайвінг (логістика постачань) (табл.3) теж зазнає багатьох змін, що торкнуться усіх законів рівноваги та постачань при переході $M \rightarrow \bar{M}$ й $T \rightarrow \bar{T}$.

Т а б л и ц я 3

Економічний реєстраційний сертифікат ERC5

ERC5			
Економічний реєстраційний сертифікат простого глобального ланцюга фінансово-виробничих відносин			
№	Виробнича специфікація		
	Умовна позначка	Назва	Опис
1	$\gamma_{n;n+1}^{st}$	Локальний закон рівноваги	КП «БСК -1»
2	$m_{n;n+1}((n+1)T; t)$	Локальний T - закон	$\gamma_{n;n+1}^{st} \left(\frac{t}{T} \right)$

№	Виробнича специфікація		
	Умовна позначка	Назва	Опис
3	$g_{n;n+1}(t)$	Локальний закон постачань	$M m_{n;n+1}((n+1)T; t)$
4	$\Gamma_{n;n+1}^{st}(X)$	Глобальний закон рівноваги	$\gamma_{n;n+1}^{st}(X)(1, 1, \dots, 1)$
5	$M_{n;n+1}(t)$	Глобальний Г - закон	$m_{n;n+1}((n+1)T; t) (1, 1, \dots, 1)$
6	$M_{n;n+1}(t)$	Глобальний закон постачань	$m_{n;n+1}((n+1)T; t) \times$ $\times (M'_p, \dots, M'_1, M')$
7	$g_n(t)$	Наведений локальний закон постачань	$\gamma_{n;n+1}^{st} \left(n + \frac{t}{T} \right) \cdot M$
8	$g_0(t)$	Опорний наведений локальний закон постачань	$\gamma_{0;1}^{st} \left(\frac{t}{M} \right) \cdot M$
9	$G_{n_1, \dots, n_{p+1}}^{(p, p-1, \dots, 0)}(t)$	Наведений глобальний закон постачань	$(g_{n_1}^p(t), \dots, g_{n_{p+1}}^0(t))$
10	$G_0^{(p, p-1, \dots, 0)}(t)$	Опорний наведений глобальний закон постачань	$\gamma_{0;1}^{st} \left(\frac{t}{T} \right) \cdot (M'_p, \dots, M'_1, M')$

Зазначимо, що перезавантаження п.г.л. ФВВ (5) при заміні закону продажів $y = P(t)$ на $y = \bar{P}(t)$ відбувається з моменту часу $t = mT$, коли у кожного підприємства-виробника $A * B_k$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$ сировина Y в стані Y_k знаходиться у кількості $M_k > \bar{M}_k$ з наднормованим запасом $\Delta M_k = M_k - \bar{M}_k$, а підприємство A по відношенню до ЗПР $y = \bar{P}(t)$ має наднормований запас основної продукції $\Delta \bar{m}(X) = m(X) - \bar{m}(X)$. Система наднормованих запасів сировини та готової продукції (СНЗ)

$$(\Delta \bar{M}_n, \Delta \bar{M}_{n-1}, \dots, \Delta \bar{M}_1, \Delta \bar{m}(X)) \tag{14}$$

становить *матеріалізацію* досліджуваного логістичного ризику ЛР1 п.г.л. ФВВ (5).

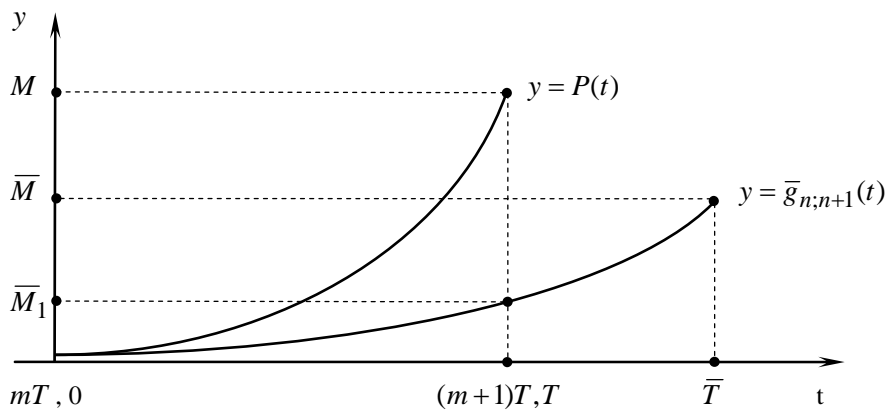


Рис.2. Графіки закону продажів $y = P(t)$ на останньому етапі $[mT, (m+1)T]$ та закону постачань $y = \bar{g}_{n;n+1}(t)$ на першому етапі $[0; \bar{T}]$, $\bar{M}_1 = \bar{g}_{n;n+1}(T)$, $\bar{M} = \bar{g}_{n;n+1}(\bar{T}) = \bar{P}(\bar{T})$

Вартість ризику ЛР1 суттєво залежить від того, як буде реалізована розподільча функція логістичного менеджменту, починаючи з моменту часу $t = mT$. У цьому сенсі проблема може бути розв'язана двома способами:

1. Якщо п.г.л.ФВВ (5) буде функціонувати по схемі, відображеної на рис.1, то у вартість ризику ЛР1 треба включити затрати на довгострокове утримання наднормованих запасів (14) у мережі складів підприємств $(B_n, A * B_{n-1}, \dots, A * B_1, B)$, а також одноразові штрафні санкції за порушення договору постачань у ланці $A \rightarrow C$ на останньому часовому етапі $[mT, (m+1)T]$ дії ЗІП $y = P(t)$ на ринку С готової продукції X (недопостачання продукції X вимірюється величиною $P(T) - \bar{P}(\bar{T})$).

2. Якщо п.г.л. ФВВ (5) буде функціонувати по схемі, відображеної на рис.2, то постачання готової продукції по ЗІП $y = \bar{P}(t)$ буде починатися з моменту часу $t = \bar{T}$. Таким чином затрати, які пов'язані з логістичним ризиком ЛР1, будуть містити в собі затрати на утримання наднормованих запасів (14) та затрати на виробництво початкового запасу основної продукції в кількості $\bar{m}(X) = \frac{1}{\bar{\alpha}(0)} \bar{g}_{n,n+1}(\bar{T})$.

З ранішеприведеного зрозуміло, що як у першому, так і у другому способі розв'язання проблеми функціонування п.г.л.ФВВ (5), пов'язаної з логістичним ризиком ЛР1, мають місце наднормовані запаси сировини, які здійснюють фінансовий тиск на відповідний глобальний ланцюг. У цій ситуації зняття навантаження на складські приміщення підприємств-виробників $(B_n, A * B_{n-1}, \dots, A * B_1, B)$, які зберігають зазначені наднормативні запаси сировини, можливо з урахуванням специфіки функціональних схем, відповідаючих рис 1 та рис.2. Розвантаження п.г.л. ФВВ (5) та вихід його на сталий режим функціонування буде відбуватися в дусі реінжинірингу, який модифікує глобальні закони постачань (табл.3) та суттєво використовує TVS-методологію [1]. Приведемо відповідні схеми розвантаження п.г.л. ФВВ (5). Для рис. 1 на рівні $M - R\left(\text{ind } \frac{X}{Y}\right)_{\text{rec}}$ та для часу, який відповідає нерівності $t \geq \bar{T}$, маємо:

$$\begin{aligned} & \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1} + \Delta\bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M} + \Delta\bar{M}, \Delta\bar{m}(X)\} \rightarrow \\ & \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1}, \bar{M}_{n-2} + \Delta\bar{M}_{n-2}, \dots, \bar{M} + \Delta\bar{M}, \Delta\bar{m}(X)\} \rightarrow \dots \\ & \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M}, \Delta\bar{m}(X)\} \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M}, \bar{m}(X)\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для рис.2 з моменту часу $t \geq \bar{T}$ маємо:

$$\begin{aligned} & \{\bar{M}_n + \Delta\bar{M}_n, \dots, \bar{M} + \Delta\bar{M}, \bar{m}(X)\} \rightarrow \\ & \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1} + \Delta\bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M} + \Delta\bar{M}, \Delta\bar{m}(X)\} \rightarrow \dots \\ & \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M}, \Delta\bar{m}(X)\} \rightarrow \{\bar{M}_n, \bar{M}_{n-1}, \dots, \bar{M}, \bar{m}(X)\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналіз модифікації M -представлень індикатора продукції X стосовно сировини Y (15) та (16) показує, що вихід п.г.л. ФВВ (5) у режим сталого функціонування відбувається відповідно за n та $n+1$ станів довжиною \bar{T} при цьому як в першому, так і другому випадках п.г.л. ФВВ (5) буде недопостачати на ринок С готової продукції X у розмірі $n \Delta\bar{m}(X)$ та $\bar{m}(X) + n\Delta\bar{m}(X)$ з однаковим дефіцитом у розмірі $n[\bar{m}(X) - \Delta\bar{m}(X)]$. Але вартість ризику ЛР1 по схемі рис.2 буде вища за рахунок того, що у п.г.л. ФВВ (5) на часовому інтервалі (T, \bar{T}) не буде задіяна розподільча функція.

Таким чином, прямі збитки підприємств, інтегрованих у п.г.л. ФВВ (5), за період перезавантаження будуть становити не менше $C_X n \Delta \bar{m}(X)$, що формує частину вартості логістичного ризику ЛР1.

4. Висновки. У роботі вперше у межах теоретико-економічних досліджень наведена класифікація логістичних ризиків, які супроводжують функціонування п.г.л. ФВВ(5) у ринковому середовищі, та сформульован апарат кількісної оцінки логістичного ризику ЛР1. У послідовних роботах автора проблема виміру логістичних ризиків буде вирішена стосовно ризиків ЛР2 – ЛР5.

Л і т е р а т у р а

1. Shcholokova T.V. Bases of Axiomatic Theory of Economic Analysis //Journal of Applied Mathematics, Statistics and informatics (JAMSI). – Trnava: The University of Saint Cyril and Metod. - 2009.-№5.Р. 61-97.

2. Матье Э., Тинсье Д. Логистика: пер. с франц. / Под ред. Н.В. Куприенко. - СПб: Нева;М.: Олма – Пресс Инвест, 2003. – 128 с.

References

1. Shcholokova T.V. Bases of Axiomatic Theory of Economic Analysis //Journal of Applied Mathematics, Statistics and informatics (JAMSI). – Trnava: The University of Saint Cyril and Metod. - 2009.-№5.Р. 61-97.

2. Mat'e Je., Tins'e D. Logistika: per. s franc. / Pod red. N.V. Kuprienko. - SPb: Neva;M.: Olma – Press Invest, 2003. – 128 s.

Щелокова Т.В.

АНАЛІЗ РИЗИКІВ В УНІВЕРСАЛЬНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ДИВЕРСИФІКОВАНИМ РИНКОМ ЗБУТУ. ЧАСТИНА 1.

В роботі сформульован аналітико-графічний апарат кількісної оцінки ризиків, пов'язаних з функціонуванням глобальних ланцюгів фінансово-виробничих відносин з диверсифікованим ринком збуту. Дан подальший розвиток методів реінжинірингу універсальних логістичних систем як адаптивного регулятора у конкурентному середовищі. Дж. 2.

Ключові слова: логістика, реінжиніринг, закон продажів, TVS – методологія, логістичні затрати.

Shcholokova T.V

THE RISK ANALYSIS IN THE UNIVERSAL LOGISTICS SYSTEMS WITH SALES MARKET DIVERSIFICATION. PART 1.

In this work analytical scheme of risks quantitative assessment in global chains of financial and production relations with sales market diversification is formulated. Source. 2.

Keywords: logistics, law of sales, reengineering, TVS-methodology, logistical costs.

Щелокова Т.В. – к.э.н., доцент кафедры «Учет и анализ хозяйственной деятельности» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

Рецензент: *Житная И.П.*, д.э.н., проф., зав. кафедрой “Учет и анализ хозяйственной деятельности” Восточноукраинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск).

ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 11 (165) 2011
Частина 2

Науковий журнал

Відповідальний редактор	В.М. Грібанов
Редактори	О.О. Мартинцева
Технічний редактор	Т.М. Дроговоз
Оригінал-макет	М.В. Кліпаков

Підписано до друку 28.10.2011 р.
Формат 70 x 108 1 /16. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 27,5. Обл. друк. арк. 28,4.
Наклад 300 прим. Вид. №2694. Замовлення №454 . Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса видавництва: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а,
Телефон (0642) 41-34-12. Факс (0642) 41-31-60.
E-mail: uni@snu.edu.ua

Надруковано у видавництві «НОУЛІДЖ»
Свідоцтво про реєстрацію серія ДК №2884 від 26.06.2007
91051, м. Луганськ, кв. Якіра, 3/316,
тел. (050) 475-35-13, e-mail: nickvnu@gmail.com