

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



ВІСНИК

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 7 (263)
2020**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Сєвєродонецьк 2020

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 7 (263) 2020

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 7 (263) 2020

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151,161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікін М.А., докт. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Горбунов М.І., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Ноженко В.С., канд. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Соколов В.І., докт. техн. наук,

Суворін О.В., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., доцент Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 5 від 27 листопада 2020 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2020

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020

З М І С Т

Арсенюк В.С., Барбарук В.М. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ КАПСУЛЬНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ, ПОВ'ЯЗАНИХ З РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ	5
Білобородова Т.О., Коверга М.О., Хамула І.В., Петров П.О., Білобородова Л.В., Нестеров М.В. МЕТОДОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОЇ ОЦІНКИ БІОМЕДИЧНИХ ДАНИХ	18
Деркач М.В., Матюк Д.С. ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЮ GY-521 ДЛЯ ОРІЄНТАЦІЇ БПЛА	24
Рязанцев О.І., Кардашук В.С., Рязанцев А.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРА ФІЛЬТРА НА ЯКІСТЬ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ	29
Бєлоха Г.С. ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ В СИСТЕМІ ГЕНЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК	35
Мелконова І.В., Романченко Ю.А., Співак О.М. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ	40
Rudniev Ye.S., Tymofieieva O.O., Brozhko R.M. SYNTHESIS OF A ROBUST CONTROL SYSTEM FOR TWO-MASS ELECTRIC DRIVE BY H_{∞} -THEORY	44
Тюндер И.С. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	49
Філімоненко Н.М., Філімоненко К.В. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ БАЗОВОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОДА ДЛЯ РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ	53
Шевченко І.С., Морозов Д.І. ДИНАМІКА «МАГНІТНОГО» ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ	58
Zbrutsky O.V., Dovhopoly A.S., Kopysov O.E., Biloborodov O.O. SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM WITH GUARANTEED ACCURACY FOR UNMANNED AIRCRAFT	66
Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Купіна О.А., Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВУЗЛА ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ МЕТАНОЛУ	71
Стенцель Й. І., Грановський Е. О., Степанов В. С. ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНО-ІМПУЛЬСНИХ ТРЕНДІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ	78
Дьомін Ю.В., Дьомін Р.Ю., Черняк Г.Ю., Ноженко В.С. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЛАТФОРМ НА ВІЗКАХ З ЦЕНТРАЛЬНИМ І БУКСОВИМ ПІДВІШУВАННЯМ	84

CONTENTS

Arsenyuk V.S., Barbaruk V.M. ANALYSIS OF CAPSULE NEURAL NETWORKS POSSIBILITIES FOR SOLVING IMAGE RECOGNITION PROBLEMS	5
Biloborodova T.O., Koverha M.O., Khamula I.V., Petrov P.O., Biloborodova L.V., Nesterov M.V. METHODOLOGY OF AUTOMATED BIOMEDICAL DATA ASSESSMENT	18
Derkach M.V., Matiuk D.S. APPLICATION OF THE GY-521 MODULE FOR UAV ORIENTATION	24
Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Ryazantsev A.O. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FILTER PARAMETER ON THE QUALITY OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERSION	29
Bielokha H.S. FREQUENCY CONVERTER IN THE SYSTEM ENERGY GENERATION WIND TURBINES	35
Melkonova I.V., Romanchenko J.A., Spivak O.M. AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF INDUSTRIAL EMISSIONS.....	40
Rudniev Ye.S., Tymofieieva O.O., Brozhko R.M. SYNTHESIS OF A ROBUST CONTROL SYSTEM FOR TWO-MASS ELECTRIC DRIVE BY H_2 -THEORY	44
Tyunder I.S. OPTIMIZATION OF THE PROCESSING SEQUENCE OF BLOCKS OF ELECTRONIC EQUIPMENT	49
Filimonenko N. M., Filimonenko K. V. ANALYSIS OF CAPABILITY FOR IMPROVEMENT OF BASIC MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRODE OF FERRO-ALLOY FURNACE.....	53
Shevchenko I.S., Morozov D.I. DYNAMIC OF "MAGNETIC" BRAKING OF INDUCTION MACHINE	58
Zbrutsky O.V., Dovhopoly A.S., Kopysov O.E., Biloborodov O.O. SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM WITH GUARANTEED ACCURACY FOR UNMANNED AIRCRAFT.....	66
Loriya M.G., Tselishev O.B., Kupina O.A., Ghezewi Abdulkhalegn Goma Ahmed MATHEMATICAL MODEL OF THE NODE COOLING AND METHANOL CONDENSATION.....	71
Stencel J. I, Granovsky E. O., Stepanov V.S. INVESTIGATION OF OSCILLATING PULSE TRENDS OF MEASURING PARAMETERS	78
Domin Yu.V., Domin R.Yu., Cherniak G.Yu., Nozhenko V.S. DETERMINATION OF INDICATORS OF VERTICAL DYNAMICS OF CONTAINER PLATFORMS ON BOGIES WITH CENTRAL AND AXLE-BOX SUSPENSION.....	84

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-5-17>

УДК 004.8/93

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ КАПСУЛЬНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ, ПОВ'ЯЗАНИХ З РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Арсенюк В.С., Барбарук В.М.

ANALYSIS OF CAPSULE NEURAL NETWORKS POSSIBILITIES FOR SOLVING IMAGE RECOGNITION PROBLEMS

Arsenyuk V.S., Barbaruk V.M.

У статті виконано огляд сьогочасних публікацій з досліджень щодо модифікацій базових алгоритмів маршрутизації, базової архітектури капсульної нейромережі та використуваних даними мережами датасетів. На підставі аналізу та узагальнення зроблені висновки щодо принципів побудови таких мереж на сучасному етапі, вибору алгоритму маршрутизації та оптимізатора для складних наборів даних.

Розглянуто питання щодо можливості застосування капсульного підходу при побудові нейронної мережі з розпізнавання зображень для мобільних додатків.

Ключові слова: розпізнавання зображень, підвищення точності визначення об'єктів, капсульна нейронна мережа, мобільний додаток, полегшені моделі

Вступ. Всі передові мережі, що використовуються при вирішенні проблем, пов'язаних з розпізнаванням зображень, можуть розглядатися як різні варіації згортальної нейронної мережі (англ. Convolution Neural Networks, CNN).

Однак, погана здатність даних мереж розпізнавати позу, текстуру, обертання, деформації зображення або його частин, їх трансляційна інваріантність, наявність «проблеми Пікассо», призвела до впровадження капсульних нейронних мереж (англ. Capsule neural network, CapsNet).

Постановка проблеми. При використанні згортальних нейронних мереж в якості класифікатора, точність класифікації навченою моделлю може значно погіршуватися у разі зміни освітленості, кута обзору, або орієнтації реальних об'єктів.

Для вирішення цієї проблеми архітектуру CNN ускладнюють шляхом збільшення кількості згортальних шарів та карт ознак, що будуть враховувати масштаб, орієнтацію і таке інше. Але це призводить до значного зростання обсягу навчальних даних (для охоплення різних варіантів і уникнення перенавчання) та збільшення розміру переднавченої моделі. Все це зменшує можливість інтегрування таких мо-

делей в мобільні додатки. Крім того, такий підхід навчання моделі має тенденцію до запам'ятовування даних, а не до узагальнювання рішень.

Капсульний підхід здатний вирішити проблеми згортальних нейромереж та підвищити точність розпізнавання зображень, однак навчання та робота таких мереж потребує значних обчислювальних потужностей.

На сьогоднішній день безпосередньо мобільні пристрої, внаслідок обмеженої потужності апаратного забезпечення, не є платформою для моделей машинного навчання.

Дану проблему вирішують за допомогою створення переднавченої моделі, яку потім інтегрують в мобільний додаток.

Але й переднавчені моделі займатимуть на мобільних пристроях певний обсяг флеш-пам'яті і їх використання буде відбирати значні обчислювальні ресурси GPU і / або CPU, вимагаючи витрат енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після першої реалізації капсульної мережі [1], додаткових пояснень щодо можливостей трансформації архітектур глибокого навчання в прозорі нейромережі за допомогою включення капсул у різні їх шари [2], завдяки подальшим дослідженням та узагальненням, що сприяли розвитку капсульного підходу побудови нейромереж, з'явилась значна кількість модифікацій базової реалізації CapsNet, спрямованих на підвищення продуктивності даної мережі та усуненню ряду її обмежень. Для цього пропонувалися модифікації алгоритму маршрутизації, зміни в різних частинах базової архітектури капсульної нейронної мережі та інше.

Оскільки базові процедури маршрутизації CapsNet (включаючи динамічну маршрутизацію [1] та EM-маршрутизацію [3]) є «дорогими» в обчислювальному відношенні, то для підвищення їх ефективності в подальших публікаціях різними авторами

були запропоновані наступні модифіковані процедури базових алгоритмів маршрутизації.

Для досягнення більш високої продуктивності S. Zhang, W. Zhao, X. Wu, Q. Zhou [4] пропонують використовувати капсули та динамічну маршрутизацію як ефективні доповнення до згорткових одиниць. Ними було запропоновано два спрощених алгоритми маршрутизації: швидку маршрутизацію на основі середнього зсуву (fast routing based on mean shift – *FRMS*) та швидку маршрутизацію на основі EM (fast routing based on EM – *FREM*), заснованих на непараметричній кластеризації та оцінці щільності ядра (kernel density estimation (KDE)). *FRMS* та *FREM* працюють швидше порівняно з алгоритмом EM-маршрутизації при деякій втраті точності на датасетах smallNORB, MNIST, Fashion-MNIST, CIFAR10 [4].

J. Choi, H. Seo, S. Im, M. Kang [5] замінюють динамічну маршрутизацію у базовій капсульній мережі на згорткове перетворення та «маршрутизацію уваги» – маршрутизацію між капсулами через модуль уваги. Під маршрутом уваги вони розуміють швидкий прохід вперед зі збереженням просторової інформації. Функцію активації *Squash* замінюють на функцію активації *tanh* на кожній капсулі каналу. Дані перетворення дають більш високу точність порівняно з базовою CapsNet, при використанні меншої кількості параметрів і меншого часу навчання [5].

W. Huang, F. Zhou для вдосконалення ієрархії капсул пропонують механізм подвійної уваги [6].

Для зменшення обмежень, викликаних обчислювальною складністю, H. Li, X. Guo, B. Dai та ін. апроксимують процес маршрутизації двома гілками: головною гілкою, що збирає первинну інформацію від її безпосереднього контакту в нижньому шарі, та допоміжною гілкою, яка поповнює головну на основі варіантів шаблонів, закодованих в інших нижчих капсулах. Ці дві гілки переплітаються своїми коефіцієнтами, так що шаблони функцій, закодовані в нижчих капсулах, можуть бути повністю використані та обмінені. Таке однопрохідне наближення є швидким, легким та контрольованим, порівняно з ітеративною, неконтрольованою схемою маршрутизації за домовленістю. Тому складність та час роботи моделі значно зменшуються [7].

H. Li, Y. Wang [8] підвищують ефективність розпізнавання капсульною мережею за рахунок оптимізації алгоритму маршрутизації і пропонують «алгоритм маршрутизації когнітивної послідовності капсульної мережі», що являє собою тримаршрутну маршрутизацію з пакетною нормалізацією [9] після кожного шару.

Z. Chen, D. Crandall [10] вбудовують процедуру маршрутизації в процедуру оптимізації з усіма іншими параметрами нейронної мережі, що дозволяє автоматизувати знаходження оптимальної кількості процедур маршрутизації.

D. Peer, S. Stabinger [11] експериментально показують, що маршрутизація за домовленістю не за-

безпечує автоматичного з'єднання капсули вищого рівня з декількома капсулами нижчого рівня для формування дерева синтаксичного аналізу. Для забезпечення формування дерева синтаксичного аналізу всіма активними капсулами вони пропонують алгоритм «динамічної глибокої маршрутизації» (dynamic deep routing), який дозволяє капсулам нижчого рівня вибрати єдину батьківську капсулу, а не відправляти свої вихідні дані в усі капсули більш високого рівня, як у випадку з вихідним алгоритмом маршрутизації за домовленістю [1]. Запропонований алгоритм дозволяє тренувати більш глибокі капсульні мережі, та є надійнішим для атак білих ящиків, ніж оригінальний алгоритм динамічної маршрутизації.

B. Jia, Q. Huang [12] наголошують на тому, що функція *Softmax* перетворює коефіцієнти зв'язку між капсулою верхнього шару і капсулою нижнього шару для алгоритму динамічної маршрутизації в насичений набір значень (щільно згрупований навколо початкового значення). Це може помилково відправити фонову інформацію до наступних шарів капсули із занадто великим коефіцієнтом, та призвести до неправильного підсумовування векторів прогнозування і тим чином вплинути на кінцевий результат класифікації. Щоб отримати більш рівномірний розподіл коефіцієнтів маршрутизації вони замінюють в алгоритмі функцію *Softmax* на функцію *Sigmoid*. Даний алгоритм отримав назву «алгоритму дисперсної динамічної маршрутизації» (disperse dynamic routing).

Зниження продуктивності мережі через цю проблему можна вирішити, використовуючи функцію *Max-Min* замість *Softmax* [13]. *Max-Min* виконує масштабно-інваріантну нормалізацію, дозволяючи капсулам нижнього рівня приймати незалежні значення на відміну від *Softmax*.

Алгоритм динамічної маршрутизації можна розглядати як задачу оптимізації, яку можна сформулювати як мінімізацію цільової функції. Він запобігає незбалансованості ймовірності активації із збільшенням кількості ітерацій [14]. Для стабілізування тренувального процесу, S. Sabour, N. Frosst, G. Hinton [1] виконали регуляцію матриці ваги, використовуючи втрати норми L_2 . Більш загальне рішення може полягати в масштабуванні матриці ваги та забезпеченні того, щоб внутрішній добуток між входною та зваженою сумою усіх окремих прогнозів первинної капсули для капсули встановлювався нижче 1 для кожної ітерації [14].

Схема маршрутизації з однаковими вагами ініціалізації в базовій CapsNet має тенденцію до повільної збіжності і призводить до низької точності. Для покращення точності у класифікації з багатьма мітками на складних наборах даних S. Ramasinghe, C. D. Athuraliya, S. H. Khan пропонують моделювати початкові ваги маршрутизації як навчальні параметри, які можна навчити за допомогою зворотного поширення помилки. В задачах класифікації з кількома мітками прогнози первинних капсул CapsNet не є незалежними [15].

F. Ribeiro, G. Leontidis, S. Kollias [16] пропонують свій алгоритм маршрутизації капсул – «варіаційну байєсівську капсульну маршрутизацію» (variational bayes capsule routing або VB-Routing). Автори показують, що імовірнісний підхід забезпечує переваги перед базовими алгоритмами маршрутизації. Моделювання невизначеності параметрів капсули та ваг маршруту, дозволяє уникнути перенавчання та нестабільності тренування, що виникають в базових алгоритмах внаслідок припущення «єдиного батька» – за допомогою якого батьківська капсула може вимагати єдиного права опіки над дочірньою капсулою (точкою даних), що в свою чергу дає безкінечну ймовірність і нульову дисперсію. Байєсівський підхід усуває колапс дисперсії, шляхом моделювання невизначеності в параметрах пози капсули та дає конкурентоспроможні результати на даних CIFAR-10, Fashion-MNIST, SVHN, демонструє значне покращення розпізнавання MNIST [16].

R. LaLonde, U. Bagci модифікують оригінальний алгоритм динамічної маршрутизації, щоб діяти локально під час маршрутизації дочірніх капсул до батьківських капсул та обмінюватися матрицями перетворення між капсулами в межах одного типу капсул. Ці зміни різко зменшують пам'ять і навантаження на параметри оригінальної реалізації капсули, дозволяють працювати на великих розмірах зображення [17].

На відміну від вищезазначених підходів, зосереджених на підвищенні ефективності процедур маршрутизації, Z. Chen, X. Li, C. Wang, D. Standall [18] намагаються їх взагалі видалити. Аргументуючи тим, що процедуру маршрутизації, призначену для отримання коефіцієнтів зв'язку між сусідніми шарами, можна вивчити та оптимізувати неявно, вони пропонують Pure CapsNets (P-CapsNets) без процедур маршрутизації. Маршрутизація за домовленістю розглядається як лінійні комбінації. Для зберігання капсул використовуються 3D-тензори. Запропонований алгоритм – це просто тензорне обчислення замість ітеративних процедур маршрутизації, яке значно пришвидшує навчання.

P-CapsNets може досягти кращої продуктивності, ніж багато інших варіантів CapsNets з різними процедурами маршрутизації, а також, ніж моделі глибокого стиснення, використовуючи значно менше параметрів. Однак P-CapsNets є більш вразливими до атак з використанням білого шуму порівняно з CNN [18]. Стаття знаходилася на розгляді для ICLR 2020 року, але в кінцевому підсумку була відкликана авторами.

За останні два роки різними авторами була запропонована значна кількість модифікацій базової архітектури [1] капсульної нейронної мережі.

З метою підвищення стабільності та швидкості збігу капсульної мережі було запропоновано ряд методів, що враховують інформацію щодо просторової структури. Mohammad Taha Bahadori [19] пропонує спектральну капсульну мережу (spectral capsule

network або S-Capsule network), що збігається швидше, ніж базова капсульна мережа з EM-маршрутизацією. Мережа вимірює збіг як ступінь вирівнювання голосів від капсул у нижчих шарах не в централізованому кластері, а в одновимірному лінійному підпросторі. Однак врахування тільки інформації про просторову структуру обмежує продуктивність капсульної мережі.

L. Zhang, M. Edraki, G. J. Qi [20] зосереджуються на формалізації принципової ідеї використання загальної довжини капсули, а не активації одного нейрона для моделювання присутності сутності [1, 3], вивчаючи групу капсульних підпросторів для представлення сукупності класів сутності. Вони стверджують, що ортогональна проекція на підпростір капсули грає вирішальну роль у забезпеченні її конкурентоспроможності, а просте групування нейронів в капсули, навпаки, не може поліпшити продуктивність. Проекцію капсули можна розглядати як багатовимірну нормалізацію ваги в підпросторах капсули, де звичайна нормалізація ваги – це просто приватний випадок проекції капсули на 1D лінії. Тому доцільно вивчити групу капсульних підпросторів, на які проектується вхідний вектор ознак. Потім довжини отриманих капсул використовувати для оцінки ймовірності належності до різних класів [20].

Через відсутність глибокої семантичної інформації базова CapsNet погано виконує завдання класифікації складних наборів даних. Для того, щоб отримати велике сприйнятливое поле в неглибокій згортковій структурі, в CapsNet використовується ряд великих згорткових ядер. Це збільшує кількість параметрів, що піддаються навчанню, і робить модель схильною до перенавчання. Для отримання надійних функцій та просторових взаємозв'язків із вихідних зображень C. Xiang, L. Zhang, Y. Tang та ін. [21] пропонують архітектуру MultiScale Capsule Network (MS-CapsNet), в якій спочатку структурна та семантична інформація отримується шляхом багатомасштабного вилучення ознак у згортковому шарі, а потім ієрархія об'єктів кодується у багатовимірну первинну капсулу у нижньому шарі оригінальної (базової) CapsNet. Використання багаторівневого згорткового ядра дозволяє зменшити кількість навчальних параметрів, а вдосконалення алгоритму відсіву для капсульного шару підвищує стійкість CapsNet.

A. Jaiswal, W. AbdAlmageed, Y. Wu, P. Natarajan [22] запропонували CapsuleGAN, що використовує CapsNet замість стандартних CNN як високопродуктивний дискримінатор в налаштуваннях генеративної змагальної мережі (generative adversarial network – GAN) під час моделювання зображень. CapsNets є кращими альтернативами CNN в якості дискримінаторів для GAN [23, 24], гарантуючи, що жодна важлива інформація не буде втрачена, як це може статися внаслідок операції об'єднання у CNN.

J. E. Lenssen, M. Fey, P. Libuschewski запропонували групові еквіваріантні шари капсул з векторами поз, обмежених як елементи групи. При зага-

льному алгоритмі маршрутизації за угодою та за певних умов, для таких груп можуть бути гарантовані еквіваріантність вихідних векторів поз а також інваріантність вихідних активацій [25]. Еквіваріантні капсульні шари вони з'єднують з груповими згортальними мережами, отримуючи архітектури глибоких нейронних мереж, що дозволяють виконувати розріджену оцінку оператора групової згортки, забезпечують контроль над конкретними властивостями еквівалентності та інваріантності і можуть використовувати маршрутизацію за угодою замість операцій об'єднання.

Експерименти N. H. Phong, B. Ribeiro показують, що CapsNet з додатковими конфігураціями, такими як збільшені кількості згортальних шарів після вхідного зображення та об'єднаних шарів реконструкції, на більш складних ніж MNIST та smallNORB наборах даних працюють зіставно з моделями CNN, при цьому різко скорочуючи час навчання [26].

S. S. Phayre, A. Sikka, A. Dhall, D. Bathula вважають, що кращого вивчення карт характерних ознак для подальшого використання в CapsNets, згортальні шари можна замінити на щільно пов'язані згортки. Додавання прямих зв'язків між двома послідовними шарами допомагає вивчити кращі карти функцій, що, у свою чергу, допомагає у формуванні первинних капсул більш високої якості [27]. У запропонованій ними модифікації базової CapsNet – DCNet (Dense Capsule Network – щільна капсульна мережа), сформована більш глибока архітектура з багатшаровою щільною згортковою підмережею, що працює на основі пропусків з'єднань. Кожен шар з'єднується з наступним шаром прямим зв'язком, додаючись в остаточний шар згортки. Це призводить до кращого градієнтного потоку ніж у безпосередньо доданих згортальних шарів [27].

James O' Neill [28] представляє сіамські капсульні мережі, які можна використовувати для парних навчальних завдань. В даній мережі зкомбіновано попарні входи з капсульною архітектурою.

Y. Liu, Q. Zhang, D. Zhang, J. Han [29] пропонують двопотокову мережу виділення «частина-ціле» (Two-Stream Part-Object Assignment Network – TSPOANet) для виявлення об'єктів, помітних на деякому фоні (сегментування з фону).

Концепція глибокої згортково-деконволюційної архітектури мережі капсул, для передбачення міток об'єктів рівня пікселів, дозволяє компенсувати втрату глобальної інформації [17, 30].

Потреба класифікації складних наборів даних призводить до того, що архітектура капсульних мереж стає більш глибокою. До складу їх архітектур в якості «магістралей», заміників згортальних шарів включають повноцінні CNN, або їх значні частини [17, 22, 31–34]. Такі конфігурації значно скорочують перенавчання та підвищують точність розпізнавання.

Хоча капсульні нейромережі залишаються ще недостатньо дослідженими, вони вже почали використовуватися не тільки в експериментах з прости-

ми еталонними, а й з складними наборами даних. Додатки з CapsNets різноманітних архітектур та модифікацій алгоритмів маршрутизації знаходять застосування в різних соціально-економічних сферах: в астрономії для автоматизації обстежень великого неба та реконструкції кольорових зображень галактик датасету від Galaxy Zoo 2 [35], в метеорології для прогнозування екстремальних погодних явищ [36], в енергетиці у моделях багатоцільової оптимізації для бази даних з генерації відновлюваної енергії за допомогою вітру [37], в гірництві для виявлення підозрілих мікросейсмічних подій при підземних розробках [38], у біологічних дослідженнях [33], для класифікації структури білків з метою визначення їх функцій та допомоги в розробці ліків [39], у сільському господарстві для моніторингу росту рослин рису та запобігання пошкоджень їх хворобами й шкідниками за допомогою розпізнавання зображень рисових полів, отриманих від безпілотних літальних апаратів [40], при виявленні хвороб листя болгарського перцю за допомогою попередньо навченої на датасеті PlantVillage архітектурі [41], в екології для знаходження в реальному часі з повітря тварин та їх підрахунку [42], для класифікації сцен зйомок дистанційного зондування (запропонована архітектура оцінювалася на наборах даних дистанційного зондування зображень UC Merced Land-Use, AID та NWPU-RESISC45) [31].

За допомогою капсульних мереж вирішується задача пошуку дорожніх знаків для безпілотних транспортних засобів [43]. Запропонована мережа забезпечує стійкість до просторових дисперсій та досягає точності 97,6% на датасеті German Traffic Sign Recognition Benchmark (GTSRB).

Просторово-часова природа даних про дорожній рух, виражених в зображеннях, дозволяє застосовувати CapsNets для прогнозування потоку руху в складних дорожніх мережах [44]. Експерименти, проведені на однорічних даних, вимірних на відірках доріг у місті Сантандер (Іспанія), демонструють, що запропонована CapsNet забезпечує більш точні прогнози швидкості транспорту, ніж CNN [44].

Per-Arne Andersen в своїй роботі демонструє життєздатність застосування капсульних нейромереж для ігрового штучного інтелекту. Поєднання CapsNet та глибокого навчання з підкріпленням дає можливість вдосконалити просунуті ігрові середовища [45].

D. Q. Nguyen, T. Vu, T. D. Nguyen та ін. [46] використовують капсульну мережу для моделювання трійки взаємозв'язків (суб'єкт, відношення, об'єкт), яка використовується для завершення графів знань та персоналізації пошуку. Запропонована ними CapsE перевершує інші моделі на базових наборах даних WN18RR та FB15k-237 для завершення графів знань та на SEARCH17 для персоналізації пошуку. Крім того, CapsE здатна ефективно моделювати відносини багато-до-багатьох [46].

Капсульні мережі знайшли застосування у сфері комп'ютерної лінгвістики. N. Zhang, S. Deng, Z. Sun та ін. [47] вважають, що CapsNet перетворюють проблему класифікації з кількома мітками в проблему багатобінарної класифікації та пропонують архітектуру капсульної мережі з вилучення відносин при автоматичній обробці текстів на природній мові для наборів даних NYT [48] (для вилучення парних сутностей) та Wikidata [49] (для вилучення відношень кількох пар сутностей). Результати, отримані ними показують, що модель покращує точність прогнозованих відносин [47].

CapsNets можуть працювати в якості структурного елемента розпізнавача мови жестів [50, 51]; визначити настрій і емоції виражені з урахуванням контексту слів [52], сигналів багатоканального електроенцефалографа [53, 54], за геометрією людського обличчя [55]; розпізнавати емоції мовлення, враховуючи просторові взаємозв'язки мовних особливостей у спектрограмах [56], виявляти наміри для систем «запитання-відповідь» [57], складати прогнози для рекомендаційних систем [58] і таке інше.

Для капсульних мереж з виявлення дій в якості вхідних даних можуть бути використані відео дані. Мережа VideoCapsuleNet [59] досягала найсучаснішої на той час продуктивності з виявлення багатьох дій, на наборах даних UCF-Sports, J-HMDB та UCF-101.

Представлена у [60] структура використовує капсули як для відео, так і для текстового подання. За допомогою візуально-текстової маршрутизації, мережа успішно сегментує дії у відео, відповідно до текстового запиту.

CapsNets успішно вирішують завдання комп'ютерної кримінології. В методі, запропонованому Н. Н. Nguyen, J. Yamagishi, I. Echizen, капсульна мережа застосовується для виявлення різного роду фальшивих зображень та відеопідробок (від атак відтворення з використанням друкованих зображень або записаних відео, до відеозаписів, створених за допомогою глибоких згорткових нейронних мереж) [34].

Генеративна змагальна мережа CapsuleGAN [22] з високопродуктивним, створеним з капсул дискримінатором, встановлює чи є зображення справжнім або штучно створеним (підробленим).

M. H. Goldani, S. Momtazi, R. Safabakhsh використовують CapsNet в задачах виявлення фейкових новин [61], L. Bonan, Z. Tong, W. Min – у розпізнаванні відбитків пальців для біометричної ідентифікації [62]. Rui Ning застосовує капсульну мережу для виявлення дій зловмисних програм з виводу криптовалюти в браузері смартфонів [63].

Капсульні мережі розв'язують проблему виявлення певних звукових подій в оточуючому середовищі [64], класифікують аудіодані [65].

Однак найбільш перспективним напрямком застосування CapsNet все ж є робота із зображеннями. Мережі показують хороші результати при сегментації зображень [17, 66], розпізнаванні рукописних

символів [67], 3D-виявленні об'єктів [68], в задачах класифікації гіперспектральних зображень на реальних датасетах [69].

При аналізі медичних зображень дослідники стикаються з такими обмеженнями наборів даних як невелика кількість анованих даних та дисбаланс класів (одна категорія даних може значно перевищувати інші), що є проблемою для ефективної роботи згортальних мереж [70]. Тому капсульні мережі, завдяки відсутності потреби у великих датасетах для навчання та відмінної спроможності щодо сегментації об'єктів, мають великий потенціал використання у медичній сфері.

Додатки, що використовують CapsNets, знайшли застосування в медичній діагностиці: для прогнозування хвороби Альцгеймера [71], класифікації типів пухлин головного мозку [72], апоптозу [72], вузликів на знімках комп'ютерної томографії при скринінгу раку легенів [74], діагностування пневмонії на рентгенівських знімках грудної клітини [75] та Covid-19 [76] за комп'ютерною томографією легень, ідентифікації раку грудей за зображеннями гістологічних препаратів [77], кількісної оцінки малярійної паразитемії [78], виявленні діабетичної ретинопатії [79], ішемічної хвороби серця [80] і таке інше.

Капсульні мережі можуть допомагати і в процесі лікування пацієнта. Наприклад працювати у системах спостереження за пацієнтами, прикутими до інвалідних крісел або апаратів штучної вентиляції легенів, але зберігаючих свої когнітивні здатності [81].

Мета статті. За останні два роки було опубліковано значну кількість інформації щодо капсульного підходу побудови нейромереж. В статті проведено аналіз та узагальнення даних досліджень з огляду на можливість використання капсульних мереж як інструмента підвищення точності розпізнавання об'єктів для мобільних додатків.

Результати досліджень. В наступний час існують дві основні проблеми капсульних нейронних мереж з базовою архітектурою: їх обчислювальна складність та низька точність на складних датасетах.

Перша з яких з'явилася внаслідок того, що з використанням алгоритмів динамічної маршрутизації або EM-маршрутизації, покликаних замінити операцію пулінгу і розширити можливість мережі реагувати на знаходження об'єкта в просторі, зростає і складність обчислень при навчанні мережі. Замість простого вибору максимуму з деякої матриці використовуються ітеративні алгоритми, представлені в [1] та [3].

Складність механізму маршрутизації є основним фактором, що впливає на швидкість обчислень при навчанні. Крім нього, час навчання залежить від архітектури мережі (кількості шарів, кількості каналів і капсул в шарах, їх розмірності).

Кількість капсул зазвичай збільшується з ростом кількості класів класифікації, що призводить до ще більшого зростання великих обчислювальних ресурсів для навчання. Обсяги розрахунків залежать

також від складності і розміру вхідних даних (кількості змінних вектору або матриці нейронів, параметрів навчання, необхідних для роботи алгоритму маршрутизації).

Модель може реалізувати свій потенціал тільки при наявності ефективного способу підгонки моделі до даних [82]. Властивості набору даних мають вирішальне значення для продуктивності алгоритму. Алгоритм варто вибирати так, щоб він давав найкращий результат на обраному датасеті, а вже при цьому намагатися модифікувати швидкість його роботи.

Варіювання гіперпараметрів, таких як швидкість навчання, імпульс, розмір пакета, відсоток переривання та зниження швидкості навчання, не робить істотного впливу на продуктивність CapsNets. Однак відповідні операції маршрутизації і кількість ітерацій алгоритму маршрутизації є найбільш важливим гіперпараметром, що істотно впливає на продуктивність капсульної нейромережі [82].

N. Ohta, S. Kawai, H. Nobuhara [83] з метою зменшення обчислювальних витрат пропонують дозволяти одній капсулі представляти кілька класів об'єктів. Для визначення відстані між класами, вони включають метод дистанційного навчання ArcFace в функцію помилок.

H. Ren, J. Su, H. Lu [84] з метою зменшення кількості параметрів вводять механізм їх спільного використання (parameter-sharing). Параметри використовуються спільно шляхом сумісного використання матриці перетворення, що вибирає особливості капсул низького рівня для кожної капсули високого рівня. Кількість матриць перетворення в даному випадку буде дорівнювати кількості капсул високого рівня, а не добутку кількості капсул низького рівня на кількість капсул високого рівня.

Друга проблема пояснюється малою дослідженістю капсульного підходу до вирішення різних завдань.

Базова капсульна мережа добре показала себе на невеликих простих датасетах, та її продуктивність поки ще не може повноцінно суперничати з продуктивністю згортальних мереж на складних наборах даних, що мають високі внутрікласові варіації і фоновий шум, а тому потребує подальшого вивчення та вдосконалення. При цьому слід відзначити, що результати її роботи на складних датасетах порівняні з результатами згортальних мереж на такому ж етапі розвитку, що є одним з показників потенціалу капсульних нейромереж.

A. Chauhan, M. Babu, N. Kandru, S. Lokegaonkar довели, що збільшення кількості каналів в першому згортальному шарі, числа капсул в шарі первинних капсул, кількості капсул в наступних згортальних шарах призводить до більш швидкого навчання і збіжності CapsNets з алгоритмом динамічної маршрутизації та CapsNets з EM-маршрутизацією. Збіжність дуже чутлива до кількості ітерацій маршрутизації. Оптимізатор *Adam* – кращий вибір для складних мереж, за ним йде *RMSProp* [85].

Точність класифікації капсульних продуктів залежить як від архітектури, так і від алгоритму маршрутизації [85].

До переднавчених моделей для мобільних пристроїв висувають наступні вимоги:

- обмеження на розмір моделей (оскільки їх потрібно завантажувати в оперативну пам'ять і віднімати значні обчислювальні ресурси GPU та / або CPU);

- обчислення, що виконує модель повинні бути досить ефективними для обробки значних обсягів інформації в розумний час, але без значного енергоспоживання або нагрівання батареї приладу.

На це необхідно зважати при створенні мережі та використовувати так звані «полегшені» моделі, що будуть враховувати вищенаведені рекомендації.

Крім того, з метою зменшення розміру навчальної моделі, необхідно оптимізувати модель для виводу, виконати операції «заморозки» та посттренингового квантування.

Це можна зробити за допомогою TensorFlow Lite, що використовує для навчання моделей бібліотеку TensorFlow.

TensorFlow генерує файл .pb – файл, що є серіалізованим графом обчислень через Protobuf. Цей файл не містить змінних. Змінні будуть зберігатися в .ckpt файлі.

Процес перетворення змінних в постійні (фіксовані значення) отримав назву заморозка. Заморожені графи (моделі) створюються за допомогою `freeze_graph.py`. Граф обчислень стає набагато простішим.

Опція `optimize_for_inference` видаляє непотрібні операції для виводу.

Квантування після навчання – це загальна методика, що дозволяє ще зменшити розмір моделі та в декілька разів зменшити затримку при невеликому погіршенні точності моделі [86].

Метод квантування з плаваючою комою включено в якості опції в конвертері моделей TensorFlow Lite.

Висновок. Хоча згортальні нейромережі є на сьогоднішній день одним з кращих засобів для розпізнавання зображень, та брак навчальних даних, трансляційна інваріантність CNN, їх схильність до змагальних нападів, можуть призвести до значного погіршення точності розпізнавання. Капсульний підхід побудови нейронних мереж дозволяє значно зменшити необхідну кількість навчальних даних, час навчання, параметрів системи у порівнянні з CNN. CapsNet можуть виявляти еквівалентні предмети, здійснювати реконструкцію зображень.

Капсульні нейромережі мають великий потенціал. З складними датасетами вони працюють порівняно зі згортальними мережами на такому ж етапі розвитку. Однак результати роботи CapsNet базової архітектури та базових алгоритмів маршрутизації на таких даних невисокі. Необхідність усунення ряду обмежень базової реалізації CapsNet та підвищення продуктивності мережі потребує її модифікації.

Точність класифікації капсульних продуктів залежить як від архітектури (кількості шарів, кількості каналів і капсул в шарах, їх розмірності), так і від алгоритму маршрутизації. Для підвищення точності розпізнавання та скорочення перенавчання при класифікації складних наборів даних доцільно робити архітектуру капсульної мережі більш глибокою, замінюючи згортальні шари повноцінними згортальними нейромережами, у яких відсутні пулінг-шари, або значними частинами CNN. Однак ускладнення архітектури впливає на час обчислень при навчанні. Властивості набору даних мають вирішальне значення для продуктивності алгоритму. Оскільки модель може реалізувати свій потенціал тільки при наявності ефективного способу підгонки моделі до даних, то алгоритм варто вибирати так, щоб він давав найкращий результат на обраному датасеті, а потім модифікувати швидкість його роботи. Методія, що будуть використовуватися мобільними пристроями повинні бути полегшеними та оптимізованими.

Література

- Sabour S., Frosst N., G. Hinton. Dynamic routing between capsules. 2017. URL: <http://papers.nips.cc/paper/6975-dynamic-routing-between-capsules.pdf>.
- Shahroudjad A., Mohammadi A., Plataniotis K. N. Improved explainability of capsule networks: relevance path by agreement. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10204.pdf>.
- Hinton G., Sabou S., Frosst N. Matrix capsules with EM routing. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJWLFGRB>
- Zhang S., Zhao W., Wu X., Zhou Q. Fast dynamic routing based on weighted kernel density estimation. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.10807.pdf>.
- Choi J., Seo H., Im S., Kang M. Attention routing between capsules. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCVW_2019/papers/NeurArch/Choi_Attention_Routing_Between_Capsule_s_ICCVW_2019_paper.pdf.
- Huang W., Zhou F. DA-CapsNet: dual attention mechanism capsule network. 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-68453-w>.
- Li H., Guo X., Dai B., Ouyang W., Wang X. Neural network encapsulation. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.03749.pdf>.
- Li H., Wang Y. Cognitive consistency routing algorithm of capsule-network. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.09062.pdf>.
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf>.
- Chen Z., Crandall D. Generalized capsule networks with trainable routing procedure. 2018. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.08692.pdf>.
- Peer D., Stabinger S., Rodriguez-Sanchez A. Training deep capsule networks. 2018. URL: https://www.researchgate.net/profile/Sebastian_Stabinger/publication/329945773_Training_Deep_Capsule_Network_s/links/5c7e8901299b1268d3a8928/Training-Deep-Capsule-Networks.pdf.
- Jia B., Huang Q. DE-CapsNet: A diverse enhanced capsule network with disperse dynamic. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/884>.
- Zhao Z., Kleinhans A., Sandhu G., Patel I., Unnikrishnanta K. P. Capsule networks with max-min normalization. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1903.09662.pdf>.
- Wang D., Liu Q. An optimization view on dynamic routing between capsules. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJtFYJDF>.
- Ramasinghe S., Athuraliya C. D., Khan S. H. A Context-aware Capsule Network for Multi-label Classification. 2018. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ECCVW_2018/papers/11131/Ramasinghe_A_Context-aware_Capsule_Network_for_Multi-label_Classification_ECCVW_2018_paper.pdf.
- Ribeiro F., Leontidis G., Kollias S. Capsule routing via variational Bayes. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1905.11455.pdf>.
- LaLonde R., Bagci U. Capsules for object segmentation. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.04241>.
- Chen Z., Li X., Wang C., Crandall D. Capsule networks without routing procedures. 2019. URL: <https://openreview.net/pdf?id=BlgNfkrYvS>.
- Bahadori M. T. Spectral capsule networks. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJuMvYPaM>.
- Zhang L., Edraki M., Qi G. J. CapProNet: Deep feature learning via orthogonal projections onto capsule subspaces. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/7823-cappernet-deep-feature-learning-via-orthogonal-projections-onto-capsule-subspaces.pdf>.
- Xiang C., Zhang L., Tang Y., Zou W., Xu C. MS-CapsNet: A novel multi-scale capsule network. 2018. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01908269/file/Xiang%20et%20al_2018_MS-CapsNet.pdf.
- Jaiswal A., AbdAlmageed W., Wu Y., Natarajan P. CapsuleGAN: Generative adversarial capsule network. 2018. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ECCVW_2018/papers/11131/Jaiswal_CapsuleGAN_Generative_Adversarial_Capsule_Network_ECCVW_2018_paper.pdf.
- Saqr R., Vivona S. CapsGAN: Using dynamic routing for generative adversarial networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.03968.pdf>.
- Majdabadi M. M., Ko S. B. MSG-CapsGAN: Multi-scale gradient capsule GAN for face super resolution. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9051244>.
- Lenssen J. E., Fey M., Libuschewski P. Group equivariant capsule networks. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/8100-group-equivariant-capsule-networks.pdf>.
- Phong N. H., Ribeiro B. Advanced capsule networks via context awareness. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1903.07497.pdf>.
- Phaye S., Sikka A., Dhalla A., Bathula D. Dense and diverse capsule networks: Making the capsules learn better. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.04001.pdf>.
- Neill J. O. Siamese capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.07242.pdf>.
- Liu Y., Zhang Q., Zhang D., Han J. Employing deep part-object relationships for salient object detection. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Liu_Employing_Deep_Part-Object_Relationships_for_Salient_Object_Detection_ICCV_2019_paper.pdf.

30. LaLonde R., Bagci U. Official Implementation of the Paper "Capsules for Object Segmentation". 2020. URL: <https://github.com/lalonderodney/SegCaps>.
31. Zhang W., Tang P., Zhao L. Remote sensing image scene classification using CNN-CapsNet. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/5/494>.
32. Yang S., Lee F., Miao R., Cai J., Chen L., Yao W., Kotani K., Chen Q. RS-CapsNet: an advanced capsule network. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9086631>.
33. Wang L., Nie R., Xin R., Zhang J., Caia J. ScCapsNet: a deep learning classifier with the capability of interpretable feature extraction, applicable for single cell RNA data analysis. 2019. URL: <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2019/05/20/506642.full.pdf>.
34. Nguyen H. H., Yamagishi J., Echizen I. Capsule-forensics: Using capsule networks to detect forged images and videos. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1810.11215.pdf>.
35. Katebi R., Zhou Y., Chornock R., Bunescu R. Galaxy morphology prediction using capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.08377.pdf>.
36. Chattopadhyay A., Nabizadeh E., Hassanzadeh P. Analog Forecasting of Extreme-Causing Weather Patterns Using Deep Learning. 2020. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019MS001958>.
37. Al-Janabi S., Alkaim A. F., Adel Z. An Innovative synthesis of deep learning techniques (DCapsNet & DCOM) for generation electrical renewable energy from wind energy. 2020. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00500-020-04905-9>.
38. Peng P., He Z., Wang L., Jiang Y. Microseismic records classification using capsule network with limited training samples in underground mining. 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70916-z>
39. Jesus D. R., Cuevas J., Rivera W., Crivelli S. Capsule networks for protein structure classification and prediction. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.07475.pdf>.
40. Li Y., Qian M., Liu P., Cai Q., Xiaoying Li, Guo J., Yan H., Yu F., Yuan K., Yu J., Qin L., Liu H., Wu W., Xiao P., Zhou Z. The recognition of rice images by UAV based on capsule network. 2018. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10586-018-2482-7>.
41. Altan G. Performance Evaluation of Capsule Networks for Classification of Plant Leaf Diseases. 2020. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1299823>.
42. Sundarama D. M., Loganathanb A. FSSCaps-DetCountNet: fuzzy soft sets and CapsNet-based detection and counting network for monitoring animals from aerial images. 2020. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Applied-Remote-Sensing-volume-14/issue-2/026521/FSSCaps-DetCountNet--fuzzy-soft-sets-and-CapsNet-based-detection/10.1117/1.JRS.14.026521.short?SSO=1>.
43. Kumar A. D., Karthika R., Parameswaran L. Novel deep learning model for traffic sign detection using capsule networks. – 2018. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1805/1805.04424.pdf>.
44. Kim Y., Wang P., Zhu Y., Mihaylova L. A capsule network for traffic speed prediction in complex road networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.10603.pdf>.
45. Andersen P. Deep reinforcement learning using capsules in advanced game environments. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.09597.pdf>.
46. Nguyen D. Q., Vu T., Nguyen T. D., Nguyen D. Q., Phung D. A capsule network-based embedding model for knowledge graph completion and search personalization. 2019. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/N19-1226.pdf>.
47. Zhang N., Deng S., Sun Z., Chen X., Zhang W., Chen H. Attention-based capsule networks with dynamic routing for relation extraction. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.11321.pdf>.
48. Riedel S., Yao L., McCallum A. Modeling relations and their mentions without labeled text. – 2010. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.2202&rep=rep1&type=pdf>.
49. Sorokin D., Gurevych I. Contextaware representations for knowledge base relation extraction. 2017. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/D17-1188.pdf>.
50. Beşer F., Kizrak M. A., Bolat B., Yildirim T. Recognition of sign language using capsule networks. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8404385>.
51. Suri K., Gupta R. Continuous sign language recognition from wearable IMUs using deep capsule networks and game theory. 2020. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2005/2005.00409.pdf>.
52. Rathnayaka P., Abeysinghe S., Samarajeewa C., Manchanayake I., Walpola M. Sentylic at IEST 2018: Gated recurrent neural network and capsule network based approach for implicit emotion detection. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.01452.pdf>.
53. Guo J., Fang F., Wang W., Ren F. EEG Emotion Recognition Based on Granger Causality and CapsNet Neural Network. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8691230>.
54. Chao H., Dong L., Liu Y., Lu B. Emotion recognition from multiband EEG signals using CapsNet. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2212/htm>.
55. Tereikovska L., Tereikovskiy I. Recognition of emotions by facial Geometry using a capsule neural network. 2019. URL: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59388634/IJCIET_10_03_13920190525-126815-1bql6w1.pdf?1558777466=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRECOGNITION_OF_EMOTIONS_BY_FACIAL_GEOMET.pdf&Expires=1602081766&Signature=FwBMBpFUGiebRjL-ZUswbT4maTfv6HR2QTjn-3GBTBpFnECJHEJw0sV1ePFvt3p-wUGvliCXbSyIbVKF4oGMElg9DzQuNnhbXFTGdaU-1jKP888hbirHQRC~xFFliGJxF-kEftnPn-Hq5kjpN3GSW90WQr9L8KES6SZfNO~wkorNpfW67pQJU1-fGDITkMm9Gp10sjkNKvGMrGXar9npefE7q-F3T9ETxyz66rkQH~HCHtdxkQj0tHij75bnPRqXCuFI7743um4eH-REcqioJ1bxWj2RNa4sJBBUJHwjok4CSiqorZL~GV2fdGh9EmxGAL-nP7OKP5oAO6Fwlmg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.
56. Wu X., Liu S., Cao Y., Li X., Yu J., Dai D., Ma X., Hu S., Wu Z., Liu X., Meng H. Speech emotion recognition using capsule networks. 2019. URL: https://www.researchgate.net/profile/Xixin_Wu/publication/n/331298406_Speech_Emotion_Recognition_Using_Capsule_Networks/links/5d0a41ac458515ea1a70f2b1/Speech-Emotion-Recognition-Using-Capsule-Networks.pdf.
57. Xia C., Zhang C., Yan X., Chang Y., Yu P. S. Zero-shot user intent detection via capsule neural networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.00385.pdf>.

58. Li C., Quan C., Peng L., Qi Y., Deng Y., Wu L. A Capsule Network for recommendation and explaining what you like and dislike. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1907.00687.pdf>.
59. Duarte K., Rawat Y., Shah M. VideoCapsuleNet: A simplified network for action detection. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/7988-videoCapsuleNet-a-simplified-network-for-action-detection.pdf>.
60. McIntosh B., Duarte K., Rawat Y. S., Shah M. Visual-Textual Capsule Routing for Text-Based Video Segmentation. 2020. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/papers/McIntosh_Visual-Textual_Capsule_Routing_for_Text-Based_Video_Segmentation_CVPR_2020_paper.pdf.
61. Goldani M. H., Momtazi S., Safabakhsh R. Detecting Fake News with Capsule Neural Networks. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2002.01030.pdf>.
62. Bonan L., Tong Z., Min W. Fast exact classification algorithm of massive fingerprint patterns based on capsule network. 2020. URL: <http://html.rhhz.net/ZGKXYDXXB/20200312.htm>.
63. Ning R. Secure Mobile Computing by Using Convolutional and Capsule Deep Neural Networks. – 2020. URL: https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1219&context=ece_etds.
64. Iqbal T., Xu Y., Kong Q., Wang W. Capsule routing for sound event detection. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.04699.pdf>.
65. Jain R. Improving performance and inference on audio classification tasks using capsule networks. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.05069.pdf>.
66. Bonheur S., Stern D., Payer C., Pienn M., Olschewski H., Urschler M. Matwo-CapsNet: A Multi-label semantic segmentation capsules network. 2019. URL: <https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/matwo-capsnet-a-multi-label-semantic-segmentation-capsules-network>.
67. Jayasundara V., Jayasekara S., Jayasekara H., Rajasegaran J., Seneviratne S., Rodrigo R. Textcaps: Handwritten character recognition with very small datasets. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.08095.pdf>.
68. Zhao Y., Birdal T., Deng H., Tombari F. 3D Point capsule networks. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/papers/Zhao_3D_Point_Capsule_Networks_CVPR_2019_paper.pdf.
69. Paoletti M. E., Haut J. M., Fernandez-Beltran R. Capsule networks for hyperspectral image classification. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8509610>.
70. Jimenez-Sanchez A., Albarqouni S., Mateus D. Capsule networks against medical imaging data challenges. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.07559.pdf>.
71. Kruthika K. R., Maheshappa H. D. CBIR system using Capsule Networks and 3D CNN for Alzheimer's disease diagnosis. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291481830176X>.
72. Afshar P., Mohammadi A., Plataniotis K. N. Brain tumor type classification via capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10200.pdf>.
73. Mobiny A., Lu H., Nguyen H. V., Roysam B., Varadarajan N. Automated classification of apoptosis in phase contrast microscopy using capsule network. 2019. URL: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10110677>.
74. Mobiny A., Nguyen H. Fast CapsNet for lung cancer screening. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.07416.pdf>.
75. Mitta A., Kumar D., Mittal M., Saba T., Abunadi I., Rehman A., Roy S. Detecting Pneumonia Using Convolutions and Dynamic Capsule Routing for Chest X-ray Images. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1068/htm>.
76. Sandu N., Karim S. The application of fast CapsNet computer vision in detecting Covid-19. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Raj_Sandu2/publication/342699125_The_application_of_fast_CapsNet_computer_vision_in_detecting_Covid-19/links/5f01b753299bf18816037ea0/The-application-of-fast-CapsNet-computer-vision-in-detecting-Covid-19.pdf.
77. Iesmantas T., Alzbutas R. Convolutional capsule network for classification of breast cancer histology images. 2018. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1804/1804.08376.pdf>.
78. Maity M., Jaiswal A., Gantait K., Chatterjee J., Mukherjee A., Quantification of malaria parasitaemia using trainable semantic segmentation and capsnet. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Kripasindhu_Gantait/publication/342770757_Quantification_of_malaria_parasitaemia_using_trainable_semantic_segmentation_and_capsnet/links/5f0effde299bf1e548b71167/Quantification-of-malaria-parasitaemia-using-trainable-semantic-segmentation-and-capsnet.pdf.
79. Kose U., Deperlioglu O., Alzubi J., Patrut B. Diagnosing of Diabetic Retinopathy with Image Dehazing and Capsule Network. 2020. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6325-6_9.
80. Butun E., Yildirim O., Talo M., Tanc R., Acharya R. 1D-CADCapsNet: One dimensional deep capsule networks for coronary artery disease detection using ECG signals. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Oezal_Yildirim/publication/338452030_1D-CADCapsNet_One_Dimensional_Deep_Capsule_Networks_for_Coronary_Artery_Disease_Detection_Using_ECG_Signals/links/5e15c7dda6fdcc283761fac8/1D-CADCapsNet-One-Dimensional-Deep-Capsule-Networks-for-Coronary-Artery-Disease-Detection-Using-ECG-Signals.pdf.
81. Janeera D. A., Sasipriya S. A Brain Computer Interface Based Patient Observation and Indoor Locating System with Capsule Network Algorithm. 2020. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-51859-2_23.
82. Lin A., Li J., Ma Z. On Learning and Learned Representation with Dynamic Routing in Capsule Networks. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/1810.04041.pdf>.
83. Ohta N., Kawai S., Nobuhara H. Analysis and Learning of Capsule Networks Robust for Small Image Deformation. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9206651>.
84. Ren H., Su J., Lu H. Evaluating Generalization Ability of Convolutional Neural Networks and Capsule Networks for Image Classification via Top-2 Classification. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1901.10112.pdf>.
85. Chauhan A., Babu M., Kandru N., Lokegaonkar S. Empirical Study on convergence of Capsule Networks with various hyperparameters. 2018. URL: <http://people.cs.vt.edu/~bhuang/courses/opt18/projects/capsule.pdf>.
86. Jacob B., Kligys S., Chen B., Zhu M., Tang M., Howard A., Adam H., Kalenichenko D. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1712.05877.pdf>.

References

- Sabour S., Frosst N., G. Hinton. Dynamic routing between capsules. 2017. URL: <http://papers.nips.cc/paper/6975-dynamic-routing-between-capsules.pdf>.
- Shahroudjeh A., Mohammadi A., Plataniotis K. N. Improved explainability of capsule networks: relevance path by agreement. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10204.pdf>.
- Hinton G., Sabou S., Frosst N. Matrix capsules with EM routing. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJWLFGRB>
- Zhang S., Zhao W., Wu X., Zhou Q. Fast dynamic routing based on weighted kernel density estimation. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.10807.pdf>.
- Choi J., Seo H., Im S., Kang M. Attention routing between capsules. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCVW_2019/papers/NeurArch/Choi_Attention_Routing_Between_Capsules_ICCVW_2019_paper.pdf.
- Huang W., Zhou F. DA-CapsNet: dual attention mechanism capsule network. 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-68453-w>.
- Li H., Guo X., Dai B., Ouyang W., Wang X. Neural network encapsulation. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.03749.pdf>.
- Li H., Wang Y. Cognitive consistency routing algorithm of capsule-network. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.09062.pdf>.
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf>.
- Chen Z., Crandall D. Generalized capsule networks with trainable routing procedure. 2018. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.08692.pdf>.
- Peer D., Stabinger S., Rodriguez-Sanchez A. Training deep capsule networks. 2018. URL: https://www.researchgate.net/profile/Sebastian_Stabinger/publication/329945773_Training_Deep_Capsule_Networks/links/5c7e8901299b1268d3a8928/Training-Deep-Capsule-Networks.pdf.
- Jia B., Huang Q. DE-CapsNet: A diverse enhanced capsule network with disperse dynamic. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/884>.
- Zhao Z., Kleinhans A., Sandhu G., Patel I., Unnikrishnanra K. P. Capsule networks with max-min normalization. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1903.09662.pdf>.
- Wang D., Liu Q. An optimization view on dynamic routing between capsules. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJjtFYJdf>.
- Ramasinghe S., Athuraliya C. D., Khan S. H. A Context-aware Capsule Network for Multi-label Classification. 2018. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ECCVW_2018/papers/11131/Ramasinghe_A_Context-aware_Capsule_Network_for_Multi-label_Classification_ECCVW_2018_paper.pdf.
- Ribeiro F., Leontidis G., Kollias S. Capsule routing via variational Bayes. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1905.11455.pdf>.
- LaLonde R., Bagci U. Capsules for object segmentation. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.04241>.
- Chen Z., Li X., Wang C., Crandall D. Capsule networks without routing procedures. 2019. URL: <https://openreview.net/pdf?id=BlgNfkrYvS>.
- Bahadori M. T. Spectral capsule networks. 2018. URL: <https://openreview.net/pdf?id=HJuMvYPaM>.
- Zhang L., Edraki M., Qi G. J. CapProNet: Deep feature learning via orthogonal projections onto capsule subspaces. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/7823-capronet-deep-feature-learning-via-orthogonal-projections-onto-capsule-subspaces.pdf>.
- Xiang C., Zhang L., Tang Y., Zou W., Xu C. MS-CapsNet: A novel multi-scale capsule network. 2018. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01908269/file/Xiang%20et%20al_2018_MS-CapsNet.pdf.
- Jaiswal A., AbdAlmageed W., Wu Y., Natarajan P. CapsuleGAN: Generative adversarial capsule network. 2018. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ECCVW_2018/papers/11131/Jaiswal_CapsuleGAN_Generative_Adversarial_Capsule_Network_ECCVW_2018_paper.pdf.
- Saqr R., Vivona S. CapsGAN: Using dynamic routing for generative adversarial networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.03968.pdf>.
- Majdabadi M. M., Ko S. B. MSG-CapsGAN: Multi-scale gradient capsule GAN for face super resolution. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9051244>.
- Lenssen J. E., Fey M., Libuschewski P. Group equivariant capsule networks. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/8100-group-equivariant-capsule-networks.pdf>.
- Phong N. H., Ribeiro B. Advanced capsule networks via context awareness. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1903.07497.pdf>.
- Phaye S., Sikka A., Dhall A., Bathula D. Dense and diverse capsule networks: Making the capsules learn better. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.04001.pdf>.
- Neill J. O. Siamese capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.07242.pdf>.
- Liu Y., Zhang Q., Zhang D., Han J. Employing deep part-object relationships for salient object detection. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Liu_Employing_Deep_Part-Object_Relationships_for_Salient_Object_Detection_ICCV_2019_paper.pdf.
- LaLonde R., Bagci U. Official Implementation of the Paper "Capsules for Object Segmentation". 2020. URL: <https://github.com/lalonderodney/SegCaps>.
- Zhang W., Tang P., Zhao L. Remote sensing image scene classification using CNN-CapsNet. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/5/494>.
- Yang S., Lee F., Miao R., Cai J., Chen L., Yao W., Kotani K., Chen Q. RS-CapsNet: an advanced capsule network. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9086631>.
- Wang L., Nie R., Xin R., Zhange J., Caia J. ScCapsNet: a deep learning classifier with the capability of interpretable feature extraction, applicable for single cell RNA data analysis. 2019. URL: <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2019/05/20/506642.full.pdf>.
- Nguyen H. H., Yamagishi J., Echizen I. Capsule-forensics: Using capsule networks to detect forged images and videos. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1810.11215.pdf>.
- Katebi R., Zhou Y., Chornock R., Bunesco R. Galaxy morphology prediction using capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.08377.pdf>.
- Chattopadhyay A., Nabizadeh E., Hassanzadeh P. Analog Forecasting of Extreme-Causing Weather Patterns Using Deep Learning. 2020. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019MS001958>.

37. Al-Janabi S., Alkaim A. F., Adel Z. An Innovative synthesis of deep learning techniques (DCapsNet & DCOM) for generation electrical renewable energy from wind energy. 2020. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00500-020-04905-9>.
38. Peng P., He Z., Wang L., Jiang Y. Microseismic records classification using capsule network with limited training samples in underground mining. 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70916-z>
39. Jesus D. R., Cuevas J., Rivera W., Crivelli S. Capsule networks for protein structure classification and prediction. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.07475.pdf>.
40. Li Y., Qian M., Liu P., Cai Q., Xiaoying Li, Guo J., Yan H., Yu F., Yuan K., Yu J., Qin L., Liu H., Wu W., Xiao P., Zhou Z. The recognition of rice images by UAV based on capsule network. 2018. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10586-018-2482-7>.
41. Altan G. Performance Evaluation of Capsule Networks for Classification of Plant Leaf Diseases. 2020. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1299823>.
42. Sundarama D. M., Loganathanb A. FSSCaps-DetCountNet: fuzzy soft sets and CapsNet-based detection and counting network for monitoring animals from aerial images. 2020. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Applied-Remote-Sensing/volume-14/issue-2/026521/FSSCaps-DetCountNet--fuzzy-soft-sets-and-CapsNet-based-detection/10.1117/1.JRS.14.026521.short?SSO=1>.
43. Kumar A. D., Karthika R., Parameswaran L. Novel deep learning model for traffic sign detection using capsule networks. – 2018. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1805/1805.04424.pdf>.
44. Kim Y., Wang P., Zhu Y., Mihaylova L. A capsule network for traffic speed prediction in complex road networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.10603.pdf>.
45. Andersen P. Deep reinforcement learning using capsules in advanced game environments. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.09597.pdf>.
46. Nguyen D. Q., Vu T., Nguyen T. D., Nguyen D. Q., Phung D. A capsule network-based embedding model for knowledge graph completion and search personalization. 2019. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/N19-1226.pdf>.
47. Zhang N., Deng S., Sun Z., Chen X., Zhang W., Chen H. Attention-based capsule networks with dynamic routing for relation extraction. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.11321.pdf>.
48. Riedel S., Yao L., McCallum A. Modeling relations and their mentions without labeled text. – 2010. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.2202&rep=rep1&type=pdf>.
49. Sorokin D., Gurevych I. Contextaware representations for knowledge base relation extraction. 2017. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/D17-1188.pdf>.
50. Beşer F., Kizrak M. A., Bolat B., Yildirim T. Recognition of sign language using capsule networks. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8404385>.
51. Suri K., Gupta R. Continuous sign language recognition from wearable IMUs using deep capsule networks and game theory. 2020. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2005/2005.00409.pdf>.
52. Rathnayaka P., Abeysinghe S., Samarajeewa C., Manchanayake I., Walpola M. Sentylic at IEST 2018: Gated recurrent neural network and capsule network based approach for implicit emotion detection. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.01452.pdf>.
53. Guo J., Fang F., Wang W., Ren F. EEG Emotion Recognition Based on Granger Causality and CapsNet Neural Network. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8691230>.
54. Chao H., Dong L., Liu Y., Lu B. Emotion recognition from multiband EEG signals using CapsNet. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2212/htm>.
55. Tereikovska L., Tereikovskiy I. Recognition of emotions by facial Geometry using a capsule neural network. 2019. URL: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59388634/IJCIET_10_03_13920190525-126815-1bql6w1.pdf?1558777466=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRECOGNITION_OF_EMOTIONS_BY_FACIAL_GEOMET.pdf&Expires=1602081766&Signature=FwBmBpFUGiebRjl-ZUswbT4maTfv6HR2QTjn-3GBTBpFnECJHEJw0sVlePFvt3p-wUGvliCXbSyIbVKF4oGMEIlg9DzQuNnhbxFTGdaU-ljKp888hbirHQRC~xFFliGJxF-kEtnPn~Hq5kjpN3GSW90WQr9L8KES6SZfNO~wkorNpFW67pQJUI~fGDITkMm9Gp10sjkNKvGMrGXar9npefE7q-F3T9ETxyz66rkQH~HCHtdxkQjo0tHij75bnPRqgXCuFI7743um4eH-REcqioJ1bxWj2RNa4sJBBUJlhWjok4CSiqorZL~GV2fDg h9EmxGAl-nP70KP5oAO6Fwlmg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.
56. Wu X., Liu S., Cao Y., Li X., Yu J., Dai D., Ma X., Hu S., Wu Z., Liu X., Meng H. Speech emotion recognition using capsule networks. 2019. URL: https://www.researchgate.net/profile/Xixin_Wu/publication/n331298406_Speech_Emotion_Recognition_Using_Capsule_Networks/links/5d0a41ac458515ea1a70f2b1/Speech-Emotion-Recognition-Using-Capsule-Networks.pdf.
57. Xia C., Zhang C., Yan X., Chang Y., Yu P. S. Zero-shot user intent detection via capsule neural networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1809.00385.pdf>.
58. Li C., Quan C., Peng L., Qi Y., Deng Y., Wu L. A Capsule Network for recommendation and explaining what you like and dislike. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1907.00687.pdf>.
59. Duarte K., Rawat Y., Shah M. VideoCapsuleNet: A simplified network for action detection. 2018. URL: <http://papers.nips.cc/paper/7988-videoCapsuleNet-a-simplified-network-for-action-detection.pdf>.
60. McIntosh B., Duarte K., Rawat Y. S., Shah M. Visual-Textual Capsule Routing for Text-Based Video Segmentation. 2020. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/papers/McIntosh_Visual-Textual_Capsule_Routing_for_Text-Based_Video_Segmentation_CVPR_2020_paper.pdf.
61. Goldani M. H., Momtazi S., Safabakhsh R. Detecting Fake News with Capsule Neural Networks. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2002.01030.pdf>.
62. Bonan L., Tong Z., Min W. Fast exact classification algorithm of massive fingerprint patterns based on capsule network. 2020. URL: <http://html.rhhz.net/ZGKXYDXB/20200312.htm>.
63. Ning R. Secure Mobile Computing by Using Convolutional and Capsule Deep Neural Networks. – 2020. URL: https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1219&context=ece_etds.

64. Iqbal T., Xu Y., Kong Q., Wang W. Capsule routing for sound event detection. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.04699.pdf>.
65. Jain R. Improving performance and inference on audio classification tasks using capsule networks. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.05069.pdf>.
66. Bonheur S., Stern D., Payer C., Pienn M., Olschewski H., Urschler M. Matwo-CapsNet: A Multi-label semantic segmentation capsules network. 2019. URL: <https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/matwo-capsnet-a-multi-label-semantic-segmentation-capsules-network>.
67. Jayasundara V., Jayasekara S., Jayasekara H., Rajasegaran J., Seneviratne S., Rodrigo R. Textcaps: Handwritten character recognition with very small datasets. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.08095.pdf>.
68. Zhao Y., Birdal T., Deng H., Tombari F. 3D Point capsule networks. 2019. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/papers/Zhao_3D_Point_Capsule_Networks_CVPR_2019_paper.pdf.
69. Paoletti M. E., Haut J. M., Fernandez-Beltran R. Capsule networks for hyperspectral image classification. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8509610>.
70. Jimenez-Sanchez A., Albarqouni S., Mateus D. Capsule networks against medical imaging data challenges. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.07559.pdf>.
71. Kruthika K. R., Maheshappa H. D. CBIR system using Capsule Networks and 3D CNN for Alzheimer's disease diagnosis. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291481830176X>.
72. Afshar P., Mohammadi A., Plataniotis K. N. Brain tumor type classification via capsule networks. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10200.pdf>.
73. Mobiny A., Lu H., Nguyen H. V., Roysam B., Varadarajan N. Automated classification of apoptosis in phase contrast microscopy using capsule network. 2019. URL: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10110677>.
74. Mobiny A., Nguyen H. Fast CapsNet for lung cancer screening. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.07416.pdf>.
75. Mitta A., Kumar D., Mittal M., Saba T., Abunadi I., Rehman A., Roy S. Detecting Pneumonia Using Convolutions and Dynamic Capsule Routing for Chest X-ray Images. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1068/htm>.
76. Sandu N., Karim S. The application of fast CapsNet computer vision in detecting Covid-19. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Raj_Sandu2/publication/342699125_The_application_of_fast_CapsNet_computer_vision_in_detecting_Covid-19/links/5f01b753299bf18816037ea0/The-application-of-fast-CapsNet-computer-vision-in-detecting-Covid-19.pdf.
77. Iesmantas T., Alzbutas R. Convolutional capsule network for classification of breast cancer histology images. 2018. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1804/1804.08376.pdf>.
78. Maity M., Jaiswal A., Gantait K., Chatterjee J., Mukherjee A., Quantification of malaria parasitaemia using trainable semantic segmentation and capsnet. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Kripasindhu_Gantait/publication/342770757_Quantification_of_malaria_parasitaemia_using_trainable_semantic_segmentation_and_capsnet/links/5f0effde299bf1e548b71167/Quantification-of-malaria-parasitaemia-using-trainable-semantic-segmentation-and-capsnet.pdf.
79. Kose U., Deperlioglu O., Alzubi J., Patrut B. Diagnosing of Diabetic Retinopathy with Image Dehazing and Capsule Network. 2020. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6325-6_9.
80. Butun E., Yildirim O., Talo M., Tanc R., Acharya R. 1D-CADCapsNet: One dimensional deep capsule networks for coronary artery disease detection using ECG signals. 2020. URL: https://www.researchgate.net/profile/Oezal_Yildirim/publication/338452030_1D-CADCapsNet_One_Dimensional_Deep_Capsule_Networks_for_Coronary_Artery_Disease_Detection_Using_ECG_Signals/links/5e15c7dda6fdcc283761fac8/1D-CADCapsNet-One-Dimensional-Deep-Capsule-Networks-for-Coronary-Artery-Disease-Detection-Using-ECG-Signals.pdf.
81. Janeera D. A., Sasipriya S. A Brain Computer Interface Based Patient Observation and Indoor Locating System with Capsule Network Algorithm. 2020. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-51859-2_23.
82. Lin A., Li J., Ma Z. On Learning and Learned Representation with Dynamic Routing in Capsule Networks. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/1810.04041.pdf>.
83. Ohta N., Kawai S., Nobuhara H. Analysis and Learning of Capsule Networks Robust for Small Image Deformation. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9206651>.
84. Ren H., Su J., Lu H. Evaluating Generalization Ability of Convolutional Neural Networks and Capsule Networks for Image Classification via Top-2 Classification. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1901.10112.pdf>.
85. Chauhan A., Babu M., Kandru N., Lokegaonkar S. Empirical Study on convergence of Capsule Networks with various hyperparameters. 2018. URL: <http://people.cs.vt.edu/~bhuang/courses/opt18/projects/capsule.pdf>.
86. Jacob B., Kligys S., Chen B., Zhu M., Tang M., Howard A., Adam H., Kalenichenko D. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1712.05877.pdf>.

Арсенюк В.С., Барбарук В.Н. Анализ возможностей капсульных нейронных сетей для решения проблем, связанных с распознаванием изображений

В статье выполнен обзор публикаций о разработках модификаций базовых алгоритмов маршрутизации, базовой архитектуры капсульной нейросети и используемых данным сетями наборов данных. На основании анализа и обобщений сделаны выводы о принципах построения таких сетей на современном этапе, выборе алгоритма маршрутизации и оптимизатора для сложных датасетов.

Рассмотрен вопрос о возможности применения капсульного подхода при построении нейронной сети, распознающей изображения, для мобильных приложений.

Ключевые слова: распознавание изображений, повышение точности определения объектов, капсульная нейронная сеть, мобильное приложение, облегченные модели.

Arsenyuk V.S., Barbaruk V.M. Analysis of capsule neural network capabilities for solving image recognition problems.

When using convolutional neural networks as a classifier, the accuracy of the trained model may deteriorate in the case of illumination, viewing angle, or classification of real objects.

To solve this problem, CNN architectures become more complex by increasing the number of convolutional layers and feature maps that take into account scale, orientation, and so on. But striving to cover options and avoid overfitting leads to a significant increase in the amount of data for training and an increase in the size of the overtrained model. All this reduces the possibility of integrating such models into mobile applications. In addition, this model training approach tends to memorize data rather than generalize solutions.

The inability of convolutional neural networks to recognize posture, texture, rotation, deformation of the image as a whole or part of it, translational invariance, the presence of the «Picasso problem» – lead to the appearance of capsular neural networks.

Over the past two years, a significant amount of information has been published about the capsule approach to building neural networks. The article analyzes and summarizes research data, taking into account the possibility of using capsule networks as a tool to improve the accuracy of object recognition.

The authors reviewed publications on the development of modifications of the basic routing algorithms, the basic architecture of the capsule neural network and the datasets used by these networks, made conclusions about the principles of building such networks at the present stage, the choice of the routing algorithm and optimizer for complex datasets.

The question of the possibility of using the capsule approach when building a neural network that recognizes images for mobile applications is considered.

For overtrained mobile models, there are a number of requirements for the size of the models and the calculations that the model will perform. Size is limited as the model is loaded into RAM and consumes significant GPU and / or CPU computing resources. The computations that the model performs should be efficient enough to process large amounts of information in a reasonable amount of time, but without significant power consumption or heating up the device's battery.

This must be taken into account when creating neural network architecture, choosing routing algorithms. Why use the so-called «lightweight» models.

In addition, in order to reduce the size of the trained model, it is necessary to optimize the model for inference, to perform the operations of «freezing» and post-training quantization.

Keywords: *image recognition, increasing the accuracy of object detection, capsule neural network, mobile application, lightweight models.*

Арсенюк В.С. – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: vlad.arsenyuk@gmail.com
Барбарук В.М. – к.т.н., доцент, директор Центру удосконалення освіти Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: barbaruk.viktor@gmail.com

Стаття подана 05.11.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-18-23>

УДК: 004.032.2

МЕТОДОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОЇ ОЦІНКИ БІОМЕДИЧНИХ ДАНИХ

Білобородова Т.О., Коверга М.О., Хамула І.В., Петров П.О.,
Білобородова Л.В., Нестеров М.В.

METHODOLOGY OF AUTOMATED BIOMEDICAL DATA ASSESSMENT

Biloborodova T.O., Koverha M.O., Khamula I.V., Petrov P.O.,
Biloborodova L.V., Nesterov M.V.

Сучасний розвиток інформаційних технологій відкриває нові можливості в біомедичному моніторингу. Широкий спектр біомедичних датчиків використовується для отримання різних фізіологічних сигналів людини, що можуть свідчити про наявність симптомів хвороби Паркінсона, зокрема, такого як тремор. Визначено, що існуючі методи класифікації даних для визначення постурального тремору недостатньо ефективні. Запропонована методологія включає отримання та сегментація даних, вилучення ознак, моделювання з етапами навчання і тестування для отримання оцінки про передбачуваний ступінь тремору. Дані отримані відповідно до п'яти ступенів тяжкості тремору і містять часову мітку і дані акселерометра по трьох осях. Отримані дані сегментовані у сегменти у вигляді односекундного вікна, що не перекривається. Обробка даних виконана для даних отриманих сегментів. З кожного компонента прискорення сегмента вилучаються наступні ознаки: середнє для x , y , z ; стандартне відхилення для x , y , z ; максимальне та мінімальне значення для x , y , z ; медіана для x , y , z ; ентропія для x , y , z ; автокореляція для x , y , z ; енергія послідовності для x , y , z ; кореляція Пірсона для x і z ; кореляція Пірсона для y і z ; кореляція Пірсона для x і y . Моделювання проведено з застосуванням алгоритму підвищення градієнтного дерева XGBoost, який застосовано для співставлення ступеню тремору відповідним виділеним векторам ознак. Навчена модель використана для оцінки ступеню тремору усіх векторів ознак в одному тесті. Середні оцінки ступеню тремору представляють оцінки ступеню кожного класу. Класифікатор надає індивідуальний результат для кожного сегмента вилучених з даних тесту ознак. Результати отриманої матриці невідповідності використано для оцінки якості класифікації. На тестових даних отримана точність класифікації з використанням параметру F1-score, що становить 92%. Розрахована важливість кожної вилученої ознаки відносно класу, яка вказує корисність ознаки при побудові дерев рішень в моделі. Визначена важливість вилучених ознак у відповідності до класу, в подальших дослідженнях використовуватиметься для зменшення обсягу вхідних даних.

Ключові слова: постуральний тремор, акселерометр, вилучення ознак, XGBoost

Вступ. Хвороба Паркінсона - це повільно прогресуюче нейродегенеративне захворювання, що протікає безсимптомно протягом тривалого часу. Рання діагностика дозволяє зафіксувати стан пацієнта на початкових стадіях і запобігти важким когнітивним розладам. Постійний моніторинг певних фізіологічних параметрів дозволяє відстежувати симптоми захворювання на ранній стадії. Це допомагає своєчасно вживати заходів для подовження початкової стадії та підтримки якості життя. Симптоми хвороби Паркінсона зазвичай поділяють на когнітивні та моторні розлади. Тремор є найпоширенішим симптомом рухового розладу, що з'являється на ранній стадії захворювань, а також є більш помітним симптомом.

Сучасний розвиток інформаційних технологій відкриває нові можливості в біомедичному моніторингу. Широкий спектр біомедичних датчиків використовується для отримання різних фізіологічних сигналів людини, що можуть свідчити про наявність симптомів хвороби Паркінсона. Використання та аналіз даних з носимих пристроїв, в тому числі і смартфонів, робить можливим раннє виявлення паркінсонічного тремору.

Велика розмаїтість датчиків використовується для отримання даних симптомів тремору: акселерометр, електроміографія, гіроскоп, детектори руху можуть використовуватися для вимірювання і аналізу симптомів. Сигнали обробляються і аналізуються з використанням різних методів оцінки стану здоров'я людини.

Методи машинного навчання є широко досліджуваним та уживаним напрямом аналізу даних носимих пристроїв, датчиків, смартфонів для визначення симптомів та ступеню їх тяжкості. Методи машинного навчання використовуються для розпізнавання наявності або відсутності тремору, його типу та ступеню тяжкості.

Автори дослідження [1] для оцінки тяжкості тремору спокою та постурального використали Linear Support Vector Machine (SVM) для аналізу даних, отриманих в трьох варіантах отримання даних з розташуванням акселерометру, гіроскопу на зап'ястку та вказівному пальці руки. Отримані результати класифікації показали точність від 50% до 88,9% в залежності від місця розташування та кількості датчиків, і виду тремору. В дослідженні [2] найвищу точність класифікації тремору спокою, що становила 85,5%, показав Decision Tree. Дані отримані з використанням гіроскопу та акселерометру. В роботі [3] використано акселерометр, гіроскоп, датчик електроміографії для класифікації симптомів тремору та брадикінезії. Для визначення відсутності або наявності тремору застосовано алгоритми Random Forest (RF) та згорткові нейронні мережі (CNN), що показали AUC 0,78 та 0,79 при застосуванні CNN та RF відповідно. Автори [4] представили ансамблеву модель, засновану на екстремальному градієнтному підсилюванні, і модель глибокого навчання, засновану на мережах з довготривалою короткостроковою пам'яттю (LSTM). Розроблені методи були оцінені за даними датчиків гіроскопа та показали найвищу кореляцію з оцінкою UPDRS-III при

використанні екстремального градієнтного підсилювання оцінці тремору у порівнянні з попередніми дослідженнями. Модель оцінювала тремор спокою з високою кореляцією, тоді як постуральний тремор оцінювався із середньою кореляцією

В табл. представлено результати проведеного аналізу досліджень. В якості критеріїв аналізу визначено алгоритм машинного навчання, що використовується для визначення тремору, та критерії класів для визначення тремору, тип тремору, спосіб отримання даних, тобто тип датчиків, їх кількість та точність результатів класифікації.

За результатами таблиці, на результат точності класифікації впливає кількість датчиків та тип тремору. Дослідження показують високу точність класифікації ступеню тяжкості або наявності тремору спокою в залежності від кількості датчиків, але результати класифікації постурального тремору все ще потребує удосконалення. Також, важливим фактором є відповідність розроблених методів автоматизації оцінки тремору та його ступеню тяжкості існуючим медичним шкалам, зокрема шкалі MDS-UPDRS [11], що використовує 5 градацій для оцінки ступеню тяжкості тремору.

Таблиця

Дослідження симптомів тремору з використанням методів машинного навчання

Алгоритм	Спосіб отримання даних (датчики)	Місце розташування датчиків	Вид тремору, що оцінюється	Класи	Результати дослідження
SVM [1]	Акселерометр, гіроскоп	Палець, зап'ясток	Постуральний, тремор спокою	Тяжкість тремору: низька, середня, висока	Точність 88.9% тремор спокою (акселерометр та гіроскоп, палець) та 84.6% постуральний тремор (палець та зап'ясток, акселерометр) Лише акселерометр на пальці для визначення постурального тремору 79.5%, на зап'ясті - 48.7%
kNN [5]	Акселерометр, гіроскоп	Палець, зап'ясток	Постуральний	Ступінь тремору: 0, 1, 2, 3, 4	Точність 92.1%,
Decision Tree [2]	Акселерометр, гіроскоп	Палець, зап'ясток	Тремор спокою	Ступінь тремору: 0, 1, 2, 3, 4	Точність 85,5%
RF, CNN [3]	Акселерометр, гіроскоп, датчик електроміографії	Кисть, передпліччя	Постуральний	Класи: відсутність/наявність тремору	AUC: CNN 0,78; RF 0,79
kNN, SVM, RF, DT, NB [6]	Акселерометр, гіроскоп	Кисть	Тремор спокою	Бінарна класифікація	-
kNN, SVM [7]	Лазер з низькоінтенсивним перетворювачем швидкості	Палець	Постуральний	Класи: висока/низька інтенсивність амплітуди тремору	Точність kNN - 92,8%, SVM - 92,8%.
NN [8]	Три інерційні датчики	Пальці	Постуральний тремор	Класи: легкий/середньо-тяжкий ступінь захворювання	Точність 83,10%
CNN [9]	Акселерометр, гіроскоп	Палець, зап'ясток		Ступінь тремору: 0, 1, 2, 3, 4	Точність 85%
XGBoost [10]	Гіроскоп	Зап'ясток, кісточка	Тремор спокою, постуральний тремор	Ступінь тремору: 0, 1, 2, 3, 4	Кореляція зі шкалою UPDRS-III 0,96

Метою роботи на підставі проведеного аналізу, визначено розробку методології визначення постурального тремору з використанням алгоритмів машинного навчання для аналізу даних датчиків.

Методологія оцінки ступеня постурального тремору на основі даних акселерометру. Запропонована методологія оцінки ступеня тремору складається з наступних кроків: (1) отримання даних, (2) сегментація даних, (3) вилучення ознак, (4) моделювання з етапами навчання і тестування.

Отримання даних. Дані отримані з використанням додатку для смартфона [12], тесту, проведеного з використанням вбудованого акселерометра смартфона. Дані отримані відповідно до шкали MDS-UPDRS [11] для оцінки постурального тремору. Ця шкала має наступні ступені тяжкості тремору і відповідну їм амплітуду:

0: відсутність тремору.

1: дуже легкий: тремор присутній, але його амплітуда менше 1 см.

2: легкий: тремор присутній, його амплітуда як мінімум 1 см, але менш 3 см.

3: помірний: тремор присутній, його амплітуда як мінімум 3 см, але менш 10 см.

4: важкий: тремор з амплітудою 10 см і більше.

Сегментація та вилучення ознак. Отримані дані сегментовані в непересічні односекундні сегменти. Вилучення ознак проведено з використанням наступних критеріїв: середнє, стандартне відхилення, енергія послідовності, кореляція Пірсона, максимальне та мінімальне значення, медіана, ентропія та автокореляція.

Вилучений вектор ознак $(\vec{f}v \in \mathbb{R}^{N_{Tr}})$, де N_{Tr} кількість сегментів, представлено наступним чином $D_{Tremor} = \{(F^{(d)}, y^{(d)})\}_r^{N_R}$, де $(F^{(d)} \in \mathbb{R}^{N_W^{(d)} \times N_{Tr}}, y^{(d)} \in \mathbb{R})$ та $F^{(d)} = [\vec{f}v_1 \vec{f}v_2 \dots \vec{f}v_t \dots \vec{f}v_{N_W^{(d)}}]$, де $N_W^{(d)}$ кількість односекундних сегментів в тесті d , та N_R загальна кількість тестів. $y^{(d)}$ є додатковою оцінкою симптомів для відповідних витягнутих векторів ознак $F^{(d)}$.

Моделювання. Алгоритм підвищення градієнтного дерева [13] використовується для співставлення ступеню тремору $y^{(d)}$ відповідним виділеним векторам ознак $F^{(d)}$. По-перше, кожен $\vec{f}v_t^{(d)}$ тесту d був анотований у відповідності до ступеню тремору $y^{(d)}$. Використовуючи N_t дерев регресії $(\{f_i\}_{i=1}^{N_t})$, метод оцінює ступінь тремору \hat{y} відповідно до функції у наступному рівнянні (1).

$$\hat{y}_t^{(d)} = \sum_{i=1}^{N_t} f_i(\vec{f}v_t^{(d)}) \quad (1)$$

де $f_i(\vec{f}v_t) = w_{q(\vec{f}v_t)}$ - це простір дерева регресії i з L листами, $q(\vec{f}v_t)$ - це структура дерева, яка відображає $\vec{f}v_t$ в індекс i представляє відповідний лист дерева, $w \in \mathbb{R}^L$ це вага листа. При навчанні моделі на кожній ітерації навчається одне дерево шляхом мінімізації цільової функції. Ця функція включає статистику першого та другого градієнтів функції втрат, засновану на різниці між передбачуваною оцінкою ступеня тремору $\hat{y}_i^{(d)}$ та оцінкою ступеня тремору $y^{(d)}$. Навчена модель використовується для оцінки ступеню тремору усіх векторів ознак в одному тесті.

Експеримент з оцінки ступеня тремору.

Збір даних проведено з використанням смартфона. При виконанні тесту на визначення тремору телефон має бути розміщений на витягнутій руці на протязі 10 секунд. В результаті тесту на тремор, отримуються дані, що містять часову мітку і дані акселерометра по трьох осях.

Отримані дані сегментовані у вигляді односекундного вікна, що не перекривається. Обробка даних виконується для даних отриманих сегментів. Для кожного компонента прискорення розраховуються наступні ознаки: середнє для x, y, z ;, стандартне відхилення для x, y, z ;, максимальне та мінімальне значення для x, y, z ;, медіана для x, y, z ;, ентропія для x, y, z ;, автокореляція для x, y, z ;, енергія послідовності для x, y, z ;, кореляція Пірсона для x і z ;, кореляція Пірсона для y і z ;, кореляція Пірсона для x і y .

Після цього етапу отримано 27 змінних для кожного сегменту даних. Класифікація даних тесту на тремор з використанням акселерометру виконується з використанням маркованих даних з п'ятьма вихідними класами: 0: відсутність тремору, 1: дуже легкий тремор, 2: легкий тремор, 3: помірний тремор, 4: значний тремор.

Оброблені дані тестів на тремор були класифіковані з використанням навчального та тестового наборів даних. Класифікація здійснюється з використанням алгоритму XGBoost.

Набір даних складається з даних 12250 часових кроків з 10 тестів із використанням акселерометра. Дані оброблено так, як це описано вище. Оброблений набір даних складається зі 100 сегментів вилучених ознак. Мітки класів розподілені рівномірно: по 20 випадків кожного класу. При навчанні та тестуванні моделі набір даних випадковим чином поділений на навчальний і тестовий набори в співвідношенні 76/24 сегментів ознак відповідно. Результати тестового набору використані для оцінки класифікації.

Для кожного сегменту ознак визначається вага кожного класу. Передбачуваним ступенем тремору є передбачуваний клас з максимальною вагою за даним спостереженням. В результаті класифікації

даним спостереженням. В результаті класифікації отримані наступні результати матриці невідповідності, що представлені на рис.

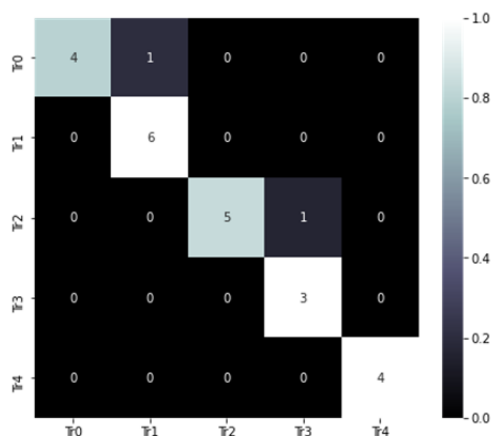


Рис. Отримана матриця невідповідності

З матриці видно, що з 24 спостережень, 22 спостереження правильно класифіковані. Для визначення якості використана оцінка отримана оцінка F1-score, яка становила 92%.

Також, для кожної вилученої ознаки розрахована її важливість та вплив відносно класу, що представляє собою оцінку, яка вказує, наскільки корисною або цінною була кожна вилучена ознака при побудові дерев рішень в моделі. Важливість обчислена для кожної ознаки та розподілена наступним чином: середнє x має індекс 70, кореляція Пірсона для y і z має індекс 13, медіана x має індекс 12, автокореляція x має індекс 9, максимальне значення x має індекс 8, енергія послідовності z має індекс 7, ентропія x має індекс 5, стандартне відхилення y та медіана y мають індекс 4, інші вилучені ознаки мають індекс 3 та менше. Індекс залежить від кількості вилучених ознак та дає можливість візуалізувати розподіл їх важливості. Отримані дані дозволяють визначити більш значущі ознаки, що в подальших дослідженнях використовуватиметься для зменшення обсягу вхідних даних.

Висновок. Представлено методологію автоматичної оцінки ступеня тяжкості пострального тремору на основі алгоритму машинного навчання XGBoost. Методологія включає етапи отримання даних, сегментація даних, вилучення ознак, моделювання з етапами навчання і тестування. Дані отримані з використанням акселерометра смартфона, сегментовані на односекундні непересічні сегменти з яких вилучені ознаки для подальшої класифікації. Модель розпізнавання ступеня тяжкості тремору отримана з використанням алгоритму XGBoost. На тестових даних отримана точність класифікації з використанням параметру F1-score та становить 92%. Визначена важливість вилучених ознак у відповідності до класу в подальших дослідженнях

використовуватиметься для зменшення обсягу вхідних даних.

Література

1. Alam M. N. et al. Tremor quantification of Parkinson's disease-a pilot study. 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). – IEEE, 2016. – С. 0755-0759.
2. Jeon H. et al. Automatic classification of tremor severity in Parkinson's disease using a wearable device. Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 9. – С. 2067.
3. Lonini L. et al. Wearable sensors for Parkinson's disease: which data are worth collecting for training symptom detection models. NPJ digital medicine. – 2018. – Т. 1. – №. 1. – С. 1-8.
4. Hssayeni, M.D., Jimenez-Shahed, J., Burack, M.A. and Ghoraani, B., 2019. Wearable sensors for estimation of parkinsonian tremor severity during free body movements. Sensors, 19(19), p. 4215.
5. Jeon, H., Lee, W., Park, H., Lee, H.J., Kim, S.K., Kim, H.B., Jeon, B. and Park, K.S., 2017. High-accuracy automatic classification of Parkinsonian tremor severity using machine learning method. Physiological measurement, 38(11), p.1980.
6. de Araújo A. C. A. et al. Hand Resting Tremor Assessment of Healthy and Patients With Parkinson's Disease: An Exploratory Machine Learning Study. Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2020. – Т. 8. – С. 778.
7. Pedrosa T. Í. et al. Machine learning application to quantify the tremor level for Parkinson's disease patients. Procedia computer science. – 2018. – Т. 138. – С. 215-220.
8. Butt A. H. et al. Biomechanical parameter assessment for classification of Parkinson's disease on clinical scale. International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2017. – Т. 13. – №. 5. – С. 1550147717707417.
9. Kim, H.B., Lee, W.W., Kim, A., Lee, H.J., Park, H.Y., Jeon, H.S., Kim, S.K., Jeon, B. and Park, K.S., 2018. Wrist sensor-based tremor severity quantification in Parkinson's disease using convolutional neural network. Computers in biology and medicine, 95, pp.140-146.
10. Hssayeni, M.D., Jimenez-Shahed, J., Burack, M.A. and Ghoraani, B., 2019. Wearable sensors for estimation of parkinsonian tremor severity during free body movements. Sensors, 19(19), p.4215.
11. C.G. Goetz et al. Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale Presentation and Clinimetric Testing Results. Movement Disorders, 23(15), 2008: 2129–2170.
12. MeCo. Meco.turion.info. URL: <http://meco.turion.info/> (дата звернення 20.10.2020)
13. Chen, T.; Guestrin, C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM Sigkdd International Conference On Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, 13–17 August 2016; pp. 785–794.

References

1. Alam M. N. et al. Tremor quantification of Parkinson's disease-a pilot study. 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). – IEEE, 2016. – С. 0755-0759.
2. Jeon H. et al. Automatic classification of tremor severity in Parkinson's disease using a wearable device. Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 9. – С. 2067.

3. Lonini L. et al. Wearable sensors for Parkinson's disease: which data are worth collecting for training symptom detection models. NPJ digital medicine. – 2018. – Т. 1. – №. 1. – С. 1-8.
4. Hssayeni, M.D., Jimenez-Shahed, J., Burack, M.A. and Ghoraani, B., 2019. Wearable sensors for estimation of parkinsonian tremor severity during free body movements. Sensors, 19(19), p. 4215.
5. Jeon, H., Lee, W., Park, H., Lee, H.J., Kim, S.K., Kim, H.B., Jeon, B. and Park, K.S., 2017. High-accuracy automatic classification of Parkinsonian tremor severity using machine learning method. Physiological measurement, 38(11), p.1980.
6. de Aratjo A. C. A. et al. Hand Resting Tremor Assessment of Healthy and Patients With Parkinson's Disease: An Exploratory Machine Learning Study. Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2020. – Т. 8. – С. 778.
7. Pedrosa T. Í. et al. Machine learning application to quantify the tremor level for Parkinson's disease patients. Procedia computer science. – 2018. – Т. 138. – С. 215-220.
8. Butt A. H. et al. Biomechanical parameter assessment for classification of Parkinson's disease on clinical scale. International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2017. – Т. 13. – №. 5. – С. 1550147717707417.
9. Kim, H.B., Lee, W.W., Kim, A., Lee, H.J., Park, H.Y., Jeon, H.S., Kim, S.K., Jeon, B. and Park, K.S., 2018. Wrist sensor-based tremor severity quantification in Parkinson's disease using convolutional neural network. Computers in biology and medicine, 95, pp.140-146.
10. Hssayeni, M.D., Jimenez-Shahed, J., Burack, M.A. and Ghoraani, B., 2019. Wearable sensors for estimation of parkinsonian tremor severity during free body movements. Sensors, 19(19), p.4215.
11. C.G. Goetz et al. Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale Presentation and Clinimetric Testing Results. Movement Disorders, 23(15), 2008: 2129–2170.
12. MeCo. Meco.turion.info. URL: <http://meco.turion.info/> (дата звернення 20.10.2020)
13. Chen, T.; Guestrin, C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM Sigkdd International Conference On Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, 13–17 August 2016; pp. 785–794.

Белобородова Т.А., Коверга М.А., Хамула И.В., Петров П.А., Белобородова Л.В., Нестеров М.В. Методология автоматической оценки биомедицинских данных

Современное развитие информационных технологий открывает новые возможности в биомедицинском мониторинге. Широкий спектр биомедицинских датчиков используется для получения различных физиологических сигналов человека, которые могут свидетельствовать о наличии симптомов болезни Паркинсона, в частности, такого как тремор. Существующие методы классификации данных для определения постурального тремора недостаточно эффективны. Предложенная методология включает получение и сегментацию данных, извлечение признаков, моделирование с этапами обучения и тестирования. Данные получены в соответствии с пятью степенями тяжести тремора и содержат временную метку и данные акселерометра по трем осям. Полученные дан-

ные сегментированные в сегменты в виде односекундного окна не перекрываются. Обработка данных выполнена для данных полученных сегментов. Из каждого сегмента компонента ускорения извлекаются следующие признаки: среднее для x, y, z; стандартное отклонение для x, y, z; максимальное и минимальное значение для x, y, z; медиана для x, y, z; энтропия для x, y, z; автокорреляция для x, y, z; энергия последовательности для x, y, z; корреляция Пирсона для x и z; корреляция Пирсона для y и z; корреляция Пирсона для x и y. Моделирование проведено с использованием алгоритма повышения градиентного дерева XGBoost, который применен для сопоставления степени тремора соответствующим выделенным векторам признаков. Обученная модель использована для оценки степени тремора всех векторов признаков в одном тесте. Средние оценки степени тремора представляют оценки степени каждого класса. Классификатор предоставляет индивидуальный результат для каждого сегмента изъятых из данных теста признаков. Результаты полученной матрицы несоответствия использованы для оценки качества классификации. На тестовых данных получена точность классификации с использованием параметра F1-score, что составляет 92%. Рассчитана важность каждого извлеченного признака относительно класса, которая указывает полезность признака при построении деревьев решений в модели. Рассчитанная важность извлеченных признаков в соответствии с классом, в последующих исследованиях будет использоваться для уменьшения объема входных данных.

Ключевые слова: *постуральный тремор, акселерометр, извлечение признаков, XGBoost*

Biloborodova T.O., Koverha M.O., Khamula I.V., Petrov P.O., Biloborodova L.V., Nesterov M.V. Methodology of automated biomedical data assessment.

The modern development of information technologies opens up new opportunities in biomedical monitoring. A wide range of biomedical sensors are used to receive various physiological signals from a person that may indicate the presence of symptoms of Parkinson's disease, such as tremor. The existing methods of data classification to determine postural tremor are not effective enough. The proposed methodology includes data acquisition and segmentation, feature extraction, modeling with training and testing. The data is obtained in accordance with five degrees of tremor severity and contains a time stamp and accelerometer data along three axes. The received data is segmented into segments as the non-overlapping one-second windows. Data processing is performed on the received segment data. The following features are extracted from each component of the segment acceleration: mean for x, y, z; standard deviation for x, y, z; maximum and minimum values for x, y, z; median for x, y, z; entropy for x, y, z; autocorrelation for x, y, z; sequence energy for x, y, z; Pearson correlation for x and z; Pearson correlation for y and z; Pearson's correlation for x and y. Modeling was carried out using the XGBoost gradient tree enhancement algorithm, which was used to compare the degree of tremor to the corresponding selected feature vectors. The trained model was used to assess the degree of tremor of all feature vectors in one test. The mean tremor grade scores represent the grade scores for each grade. The classifier provides an individual result for each segment of the features removed from the test data. The results of the obtained matrix confusion are used to assess the quality of the classification. The obtained model is evaluated on test data. The classification accuracy is evaluated using the F1-score parameter, which is 92%. The importance of each extracted

feature relative to the class is calculated, and indicates the usefulness of features when building decision trees in the model. The calculated importance of the extracted features in accordance with the class will be used in the future research to reduce the amount of input data.

Keywords: *postural tremor, accelerometer, feature extraction, XGBoost*

Білобородова Т.О. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: beloborodova.t@gmail.com

Коверга М.О. – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: healthunder@gmail.com

Хамула І.В. – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: irakhamula24@gmail.com

Петров П.О. – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: petrik@ppetrik.com

Білобородова Л.В. – начальник зміни, інформаційно-телекомунікаційний центр Головного інформаційно-телекомунікаційного вузла зв'язку Збройних Сил України.

Нестеров М.В. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: maksym.nesterov@gmail.com

Стаття подана 20.09.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-24-28>

УДК: 004.4'681.3

ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЮ GY-521 ДЛЯ ОРІЄНТАЦІЇ БПЛА

Деркач М.В., Матюк Д.С.

APPLICATION OF THE GY-521 MODULE FOR UAV ORIENTATION

Derkach M.V., Matiuk D.S.

У статті розглянута задача визначення положення в тривимірному просторі, оскільки це один з ключових етапів при створенні БПЛА, що за останні кілька років стали дуже популярними і водночас корисними, так як здатні виконувати широкий спектр завдань. Вирішення цієї задачі дозволяє отримати значення кута нахилу за допомогою акселерометра та миттєвої кутової швидкості з роздільною здатністю, заданою в настройках, в градусах в секунду завдяки гіроскопу, тобто можна визначити рух, падіння об'єкта або поштовх об перешийку, щоб оминати її. Визначено конфігурацію БПЛА та комунікаційний зв'язок. Також у роботі наведено принцип обробки даних мікроконтролером з суміщених датчиків, на прикладі застосування модуля GY-521, головним елементом якого є мікросхема MPU-6050, що об'єднала в одному корпусі 3х-осевий гіроскоп, 3х-осевий акселерометр і термометр. Область застосування модулю досить широка, а саме для координації різних пристроїв - від просто детектора руху до системи орієнтації різних роботів або управління рухами будь-яким пристроями, до того ж суттєвою перевагою модуля GY-521 є низька вартість і низьке енергоспоживання. Завдяки реалізації внутрішнього зв'язку між мікроконтролером STM32 і модулем GY-521 по шині даних I²C, протестована робота сенсора для орієнтації БПЛА; наведено фрагмент коду, що демонструє настройку модуля, тобто встановлення режиму роботи, значення чутливості сенсора і діапазон вимірювань датчика MPU-6050, та фрагмент коду для зчитування показників датчиків. В роботі використано середовище розробки Keil μ Vision, що представляє собою набір утиліт для виконання повного комплексу заходів з написання програмного забезпечення для мікроконтролерів на мові програмування C++. Отримані результати перевірки роботи модуля GY-521 демонструють показання акселерометра по осі x. **Ключові слова:** модуль, датчик, мікросхема, мікроконтролер, сенсор, шина даних.

Вступ. Інформаційні технології проникають практично в усі сфери сучасного життя людини, що, в свою чергу, дозволяє автоматизувати робочий процес або скоротити час його виконання. За останні кілька років клас пристроїв - безпілотні літальні апарати (БПЛА) - став дуже популярним і водночас корисним, так як БПЛА доставляють їжу і покупки,

допомагають гасити пожежі, беруть участь в гонках і змаганнях, знімають відео, тощо.

У загальному випадку під БПЛА розуміється літальний апарат без екіпажу на борту, який використовує аеродинамічний принцип створення підйомної сили за допомогою фіксованого або обертового крила, оснащений двигуном і має корисне навантаження і тривалість польоту, достатні для виконання спеціальних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів управління БПЛА є автоматичне керування, яке забезпечує можливість повністю автономного польоту БПЛА по заданій траєкторії на заданій висоті із заданою швидкістю і зі стабілізацією кутів орієнтації [1-3]. У зв'язку з чим, виникає задача визначення положення апарату в просторі, що, в свою чергу, передбачає спільне використання гіроскопа, акселерометра.

В статті [4] робиться висновок про переваги використання датчиків MEMS (мікроелектромеханічні системи), таких як IMU (MPU6050), магнітометр (HMC 5883L), GPS (UBLOX lea-6h).

Автори [5] стверджують, що система визначення кута нахилу і швидкості багатороторного коптера займає перше місце через свою важливу роль в стабілізації.

Ще однією перевагою сенсора для визначення кутів і швидкостей MPU6050 є низька вартість і низьке енергоспоживання, що підтверджує робота авторів [6,7].

Оскільки, задача визначення значень кута нахилу та швидкості зміни кута при русі різних пристроїв в просторі, виникає доволі часто, тому випускають суміщені датчики. Таким є й модуль GY-521, головним елементом якого є мікросхема MPU-6050, що об'єднала в одному корпусі 3х-осевий гіроскоп, 3х-осевий акселерометр і термометр.

Мета статті. Застосувати модуль GY-521 для визначення положення в просторі БПЛА, що дозволить отримати значення кута нахилу та швидкості зміни кута.

Основний зміст роботи. Розглянемо задачу визначення положення в просторі БПЛА: кути нахилу можливо визначити за допомогою акселерометра, а швидкість зміни кута завдяки гіроскопу. Спільне використання акселерометра і гіроскопа дозволяє визначити рух тіла в тривимірному просторі, так як при русі апарату на нього діють різні прискорення, а не тільки прискорення вільного падіння Землі. До того ж, наряду з обертаннями по годинниковій стрілці, неминучим є обертання проти годинникової стрілки, тобто виникає сила Коріоліса – завдяки чому БПЛА починає відхилятися й виникають поперечні коливання. Сила Коріоліса залежить від кутової швидкості обертання, відповідно, гіроскоп видає значення кутової швидкості. Отриманий сигнал є дискретним, та для отримання кута відхилення від початкового положення необхідно його інтегрувати:

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $\alpha(t)$ – кут відхилення від початкового положення до моменту часу t ; $\omega(\tau)$ – кутова швидкість в поточний момент часу τ .

Для одновимірного випадку:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \omega_i \Delta t. \quad (2)$$

Тоді, для тривимірного випадку:

$$q_{i+1} = q_i \cdot \begin{pmatrix} \omega_i^x \Delta t \\ \omega_i^y \Delta t \\ \omega_i^z \Delta t \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В даному проєкті використано модуль GY-521 на мікросхемі MPU-6050, який містить в собі MEMS гіроскоп і MEMS акселерометр. Вбудований датчик температури призначений для вимірювання температури і має діапазон вимірювань від -40°C до $+85^\circ\text{C}$.

При повороті БПЛА в просторі гіроскоп видає значення миттєвої кутової швидкості з роздільною здатністю, заданою в настройках, в градусах в секунду. Обробляючи кути трьох осей гіроскопа згідно формул, наведених вище, можна отримати орієнтацію об'єкта в просторі.

Вимірюючи прискорення трьох осей акселерометра можна отримати дані лінійного прискорення, тобто можна визначити рух, падіння об'єкта або поштовх об перешкоду, щоб оминати її.

Обробка даних здійснюється за допомогою 16-бітового АЦП (аналого-цифрового перетворювача) на кожен канал, тому він обробляє значення x , y і z одночасно.

Датчик MPU-6050 працює від напруги $\sim 2.4 - 3.5\text{В}$, і щоб стабілізувати харчування, на модулі GY-521 додано стабілізатор напруги на 3.3В з малим падінням напруги, тому модуль можна підключити до напруги 5В і 3.3В .

Для обміну даними між модулем GY-521 і мікроконтролером STM32 використовується шина I²C (Inter-Integrated Circuit). У мікроконтролері STM32 є апаратно реалізовані приймачі I²C шини. Інтерфейс I²C являє собою послідовну шину, що складається з двох двонаправлених ліній зв'язку SDA (Serial Data Address) і SCL (Serial Clock), та допускає кілька провідних пристроїв на шині й підтримує високошвидкісний режим.

Окрім модуля GY-521 і мікроконтролера STM32, для реалізації проєкту, використані наступні компоненти:

- рама для БПЛА F450;
- двигуни безколекторні a2212 / 13t 1000kv;
- драйвера двигунів hw30a;
- бездротовий модуль NRF24L01;
- лопаті.

Схема БПЛА зображена на рис.1.

Насамперед, для тестування роботи модулю GY-521 необхідно встановити режим роботи, значення чутливості сенсора і діапазон вимірювань датчика MPU-6050.

Можливі режими роботи:

- для акселерометра: $\pm 2g, \pm 4g, \pm 6g, \pm 8g, \pm 16g$;
- для гіроскопа: $\pm 250^\circ, \pm 500^\circ, \pm 1000^\circ, \pm 2000^\circ$.

В даному випадку датчик налаштовано на діапазон $\pm 8g$. Для 16 розрядного АЦП датчика - це значення від -215 до 215 , тому можливі значення $\pm 2^{15}/16*8$, тобто -16384 до 16384 .

Фрагмент коду, наведений нижче, демонструє настройку датчика:

```
void init_mpu6050(void)
{
  //reset mpu and 8 MHz
  i2c_wr_8(0x6b, 0x80);
  delay(100);
  i2c_wr_8(0x6b, 0x0);
  //reset XYZ (104 dec)
  i2c_wr_8(0x68, 0x7);
  delay(100);
  delay(100);
  i2c_wr_8(28, 0x10); //8g=0x10, 0x18=16g(self-test)
  i2c_wr_8(25, 3); //sample rate
  i2c_wr_8(27, (0<<4|0<<3)); //+-250s - div to
  131
  i2c_wr_8(56, (1<<0)); // interrupt
}
```

Процес зчитування даних виконується наступним чином: виникають переривання близько 45 разів за секунду, кожне переривання триває близько 22 мілісекунд, за одне переривання знімаються показники датчиків:

```
void EXTI15_10_IRQHandler(void)
{
  if( (EXTI->PR & (1<<15)) !=0 )
  {
    i2c_rd_8(58, 1);
    i2c_rd_8(0x3b, 14);
    x_ac = (a0z[0]<<8 | a0z[1]);
    y_ac = (a0z[2]<<8 | a0z[3]);
    z_ac = (a0z[4]<<8 | a0z[5]);
    t_g = (a0z[6]<<8 | a0z[7]);
    x_gr = (a0z[8]<<8 | a0z[9]);
    y_gr = (a0z[10]<<8 | a0z[11]);
    z_gr = (a0z[12]<<8 | a0z[13]);
  }
}
```

```

EXTI->PR |= (1<<15);
}
EXTI->PR |= (1<<15);
return;
}
    
```

Дані передаються 8-бітними посилками, старшим бітом вперед. В результаті перевірки роботи модулю GY-521 отримані показання акселерометра по одній з осей, а саме осі x (рис. 2).

Висновок. Застосування модуля GY-521 для орієнтації БПЛА є доцільним, оскільки його головним елементом є мікросхема MPU-6050, що має низьку вартість і низьке енергоспоживання. До суттєвих переваг також можна віднести те, що модуль GY-521 є прикладом суміщених датчиків, тобто спільного використання акселерометра і гіроскопа, завдяки чому можливо одночасно отримати значення кута нахилу та швидкості зміни кута, тим самим визначити положення БПЛА в тривимірному просторі.

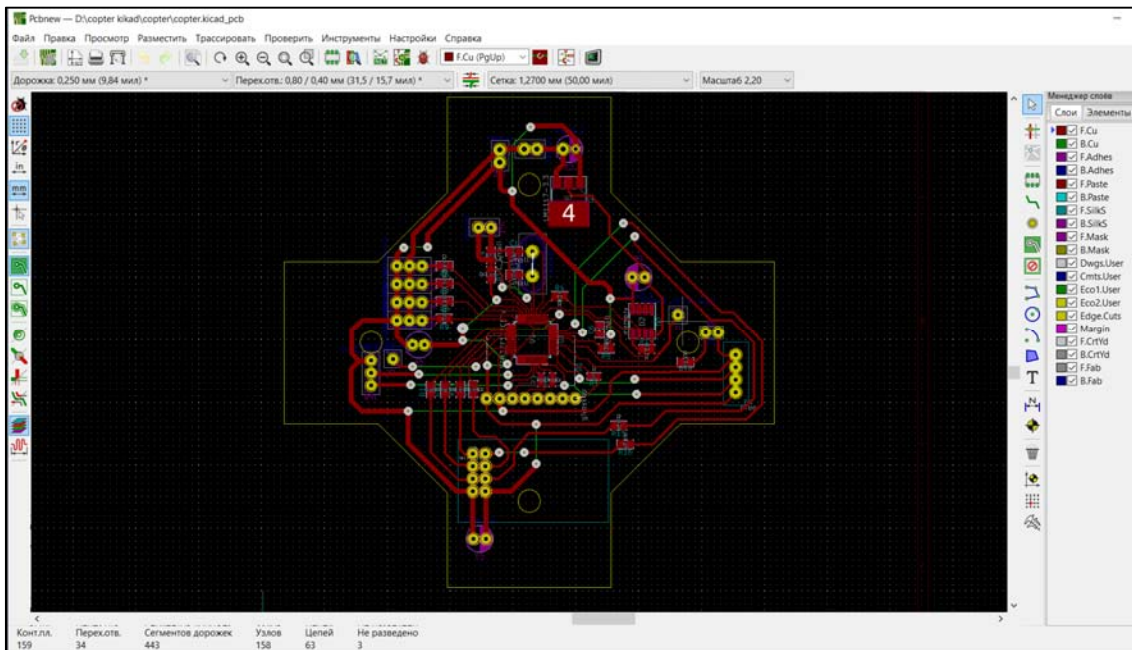


Рис. 1. Схема БПЛА

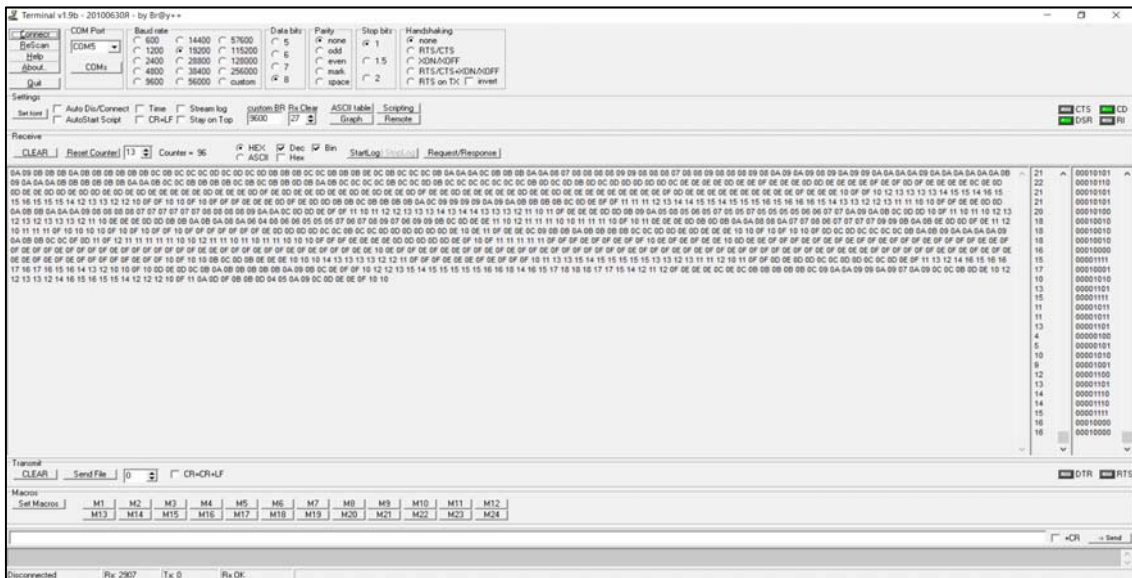


Рис. 2. Отриманні показання акселерометра

Література

1. Keke G. A fuzzy controller: Using monocular computer vision to see and avoid obstacle for quadcopter / G. Keke, L. Wei, T. Ligu // 5th intern. workshop on computer science and engineering: Information processing and control engineering: WCSE 2015-IPSE: Proc. Chenghu: Science and Engineering Inst. – 2015.
2. McGuire K. Efficient Optical Flow and Stereo Vision for Velocity Estimation and Obstacle Avoidance on an Autonomous Pocket Drone / K. McGuire, G. de Croon, C. De Wagter, K. Tuyls and H. Kappen // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2017. – Vol. 2, no. 2. – pp. 1070-1076.
3. Li K. Self-positioning for UAV indoor navigation based on 3D laser scanner, UWB and INS / K. Li, C. Wang, S. Huang, G. Liang, X. Wu and Y. Liao // IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Ningbo. – 2016. – pp. 498-503.
4. Elbanna A.E.A. Improved Design and Implementation of Automatic Flight Control System (AFCS) for a Fixed Wing Small UAV / A.E.A. Elbanna, T.H.M. Soliman, A.N. Ouda, E.M. Hamed // Radioengineering. – 2018. – Vol. 27. – pp. 882-890.
5. Albaghdadi A.F. An Optimized Complementary Filter For An Inertial Measurement Unit Contain MPU6050 Sensor / A.F. Albaghdadi, A.A. Ali // Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering. – 2019. – Vol. 15, Issue 2. – pp. 71-77.
6. Saw Kyw Wai Hin Ko. Basic Multicopter Control with Inertial Sensors / Saw Kyw Wai Hin Ko, Dr.Kyaw Soe Lwin // International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP). – 2014. – Vol. 4, Issue 9.
7. Di Franco C. Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints / C. Di Franco, G. Buttazzo // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2016. – №83 (3-4).

References

1. Keke G. A fuzzy controller: Using monocular computer vision to see and avoid obstacle for quadcopter / G. Keke, L. Wei, T. Ligu // 5th intern. workshop on computer science and engineering: Information processing and control engineering: WCSE 2015-IPSE: Proc. Chenghu: Science and Engineering Inst. – 2015.
2. McGuire K. Efficient Optical Flow and Stereo Vision for Velocity Estimation and Obstacle Avoidance on an Autonomous Pocket Drone / K. McGuire, G. de Croon, C. De Wagter, K. Tuyls and H. Kappen // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2017. – Vol. 2, no. 2. – pp. 1070-1076.
3. Li K. Self-positioning for UAV indoor navigation based on 3D laser scanner, UWB and INS / K. Li, C. Wang, S. Huang, G. Liang, X. Wu and Y. Liao // IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Ningbo. – 2016. – pp. 498-503.
4. Elbanna A.E.A. Improved Design and Implementation of Automatic Flight Control System (AFCS) for a Fixed Wing Small UAV / A.E.A. Elbanna, T.H.M. Soliman, A.N. Ouda, E.M. Hamed // Radioengineering. – 2018. – Vol. 27. – pp. 882-890.
5. Albaghdadi A.F. An Optimized Complementary Filter For An Inertial Measurement Unit Contain MPU6050 Sensor / A.F. Albaghdadi, A.A. Ali // Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering. – 2019. – Vol. 15, Issue 2. – pp. 71-77.
6. Saw Kyw Wai Hin Ko. Basic Multicopter Control with Inertial Sensors / Saw Kyw Wai Hin Ko, Dr.Kyaw Soe

- Lwin // International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP). – 2014. – Vol. 4, Issue 9.
7. Di Franco C. Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints / C. Di Franco, G. Buttazzo // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2016. – №83 (3-4).

Деркач М.В., Матюк Д.С. Применение модуля GY-521 для ориентации БПЛА

В статье рассмотрена задача определения положения в трехмерном пространстве, поскольку это один из ключевых этапов при создании БПЛА, которые за последние несколько лет стали очень популярными и одновременно полезными, так как способны выполнять широкий спектр задач. Решение этой задачи позволяет получить значение угла наклона с помощью акселерометра и мгновенной угловой скорости с разрешением, заданным в настройках, в градусах в секунду благодаря гироскопу, то есть можно определять движение, падение объекта или столкновение с препятствием, чтобы обходить его. Определена конфигурация БПЛА и коммуникационная связь. Также в работе приведен принцип обработки данных микроконтроллером с совмещенных датчиков на примере применения модуля GY-521, главным элементом которого является микросхема MPU-6050, объединившая в одном корпусе 3х-осевой гироскоп, 3х-осевой акселерометр и термометр. Область применения модуля достаточно широкая, а именно для координации различных устройств - от просто детектора движения до системы ориентации различных роботов или управления движениями любыми устройствами, причем существенным преимуществом модуля GY-521 является низкая стоимость и низкое энергопотребление. Благодаря реализации внутренней связи между микроконтроллером STM32 и модулем GY-521 по шине данных I²C, протестирована работа сенсора для ориентации БПЛА; приведен фрагмент кода, демонстрирующий настройку модуля, то есть установление режима работы, чувствительность сенсора и диапазон измерений датчика MPU-6050 и фрагмент кода для считывания показаний датчиков. В работе использована среда разработки Keil μ Vision, представляющая собой набор утилит для выполнения полного комплекса мероприятий по написанию программного обеспечения для микроконтроллеров на языке программирования C++. Полученные результаты проверки работы модуля GY-521 демонстрируют показания акселерометра по оси x.

Ключевые слова: модуль, датчик, микросхема, микроконтроллер, сенсор, шина данных.

Derkach M., Matiuk D. Application of the GY-521 module for UAV orientation

The article considered the problem of determining the position in three-dimensional space. This is one of the key stages in the creation of UAVs, which over the past few years have become very popular and at the same time useful. Since UAVs are capable of performing a wide range of tasks: monitoring various environmental parameters, delivering food and shopping, extinguishing fires, races and competitions, filming videos, etc. Solving the problem of determining the position in space allows you to obtain the value of the tilt angle using the accelerometer and the instantaneous angular velocity thanks to the gyroscope. That, in turn, allows you to determine the movement, falling of an object or collision with an obstacle in order to go around it. In the work, the configurations of the UAV and communication links were determined. And also the principle of data processing by a microcontroller from com-

bined sensors was given on the example of using the GY-521 module. The main element of the GY-521 module is the MPU-6050 microcircuit, which combines a 3-axis gyroscope, a 3-axis accelerometer and a thermometer in one package. The scope of the module is wide enough, namely for the coordination of various devices - from a simple motion detector to an orientation system for various robots or control of movements by any device. Moreover, a significant advantage of the GY-521 module is its low cost and low power consumption. Thanks to the implementation of internal communication between the STM32 microcontroller and the GY-521 module via the I2C data bus, the operation of the sensor for the orientation of the UAV was tested. Also, a code fragment was shown that demonstrates the module setting that is, setting the operating mode, sensor sensitivity and measuring range of the MPU-6050 sensor and a code fragment for reading the sensor readings. The development environment Keil μ Vision was used in the work, which is a set of utilities for performing a full range of activities for writing software for microcontrollers in

the C++ programming language. The obtained test results of the GY-521 module demonstrate the readings of the accelerometer along the x-axis.

Keywords: module, sensor, microcircuit, microcontroller, sensor, data bus.

Деркач М.В. – доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: gln459@gmail.com

Матюк Д.С. – здобувач вищої освіти Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: dmayuk@mail.com

Стаття подана 18.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34>

УДК 004.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРА ФІЛЬТРА НА ЯКІСТЬ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ

Рязанцев О.І., Кардашук В.С., Рязанцев А.О.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FILTER PARAMETER ON THE QUALITY OF ANALOG-TO-DIGITAL SIGNAL CONVERSION

Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Ryazantsev A.O.

В статті досліджено вплив параметра фільтра нижніх частот, частоти зрізу і порядку фільтра на вході аналого-цифрового перетворювача на основну похибку перетворення при обробці аналогових сигналів. Визначено, що при прийомі аналогового сигналу при перетворенні в цифровий код велике значення має його якісний прийом. У цьому випадку доречним є використання ФНЧ від низькочастотних шумів та інших перешкод, які впливають на його якість. Встановлено, що зниження частоти зрізу фільтра нижніх частот зменшує рівень адитивної складової похибки, але при цьому в деяких випадках також знижується стабільність роботи системи. Зазначено, що використання цифрового фільтра підвищує точність та швидкість перетворення аналогової інформації в цифровий код. Визначено, що процедура нормалізації сигналів передбачає повне або часткове усунення впливу перешкод при одночасній обробці інформаційної частини сигналу. Параметри фільтра та його характеристики залежать від місця включення фільтра по відношенню до комутаційного пристрою. Розглянуті сучасні високопродуктивні пристрої введення/виведення та цифрової обробки інформації, які конструктивно виконуються у вигляді модулів введення аналогової інформації для створення комплексів на базі персональних комп'ютерів або мікроконтролерів. Для моделювання прийому аналогового сигналу запропоновано використати блоки, програмні модулі та алгоритм роботи програмного елемента обробки аналогового сигналу з бібліотеки алгоритмічних елементів. Представлені результати моделювання цифрового фільтра. Для моделювання обрано перетворення сигналу від датчика напруги. Перетворення напруги в цифровий код здійснювалось для 12-розрядного АЦП. Значення параметра фільтра змінювалось в діапазоні від 0,3 до 1,0. Результати моделювання показують, що для якісного перетворення аналогового сигналу в цифровий код необхідна попередня нормалізація з подальшою цифровою фільтрацією.

Ключові слова: цифровий фільтр, аналогово-цифрове перетворення, інформаційно-вимірвальна система, оброблення сигналів, нормалізація, похибка.

Вступ. Дослідження новітніх методів перетворення аналогової інформації в цифрову і навпаки на

даному етапі розвитку інформаційних та схемотехнічних рішень є досить актуальним, оскільки від якості та швидкодії такого перетворення залежить достовірність та вчасність отриманих результатів у різних сферах технологічних процесів вимір температури, тиску, швидкості переміщення тощо. На додаток на кінцевий результат перетворення впливають ряд негативних чинників, що виникають в інформаційно-вимірвальних системах. При цифровій обробці сигналів, які повільно змінюються необхідно враховувати похибки, що вносяться аналоговими блоками ІВС, в першу чергу – похибка перетворення напруги вхідним фільтром і аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) [1].

Постановка проблеми. Аналоговий сигнал є безперервною функцією часу, в АЦП він перетворюється в послідовність цифрових значень. Важливим моментом тут є визначення частоти вибірки цифрових значень аналогового сигналу, тобто частоти дискретизації АЦП. Постійно змінюваний сигнал з обмеженою спектральною смугою перетворюється у цифровий і вихідний сигнал може бути точно відновлений з дискретних в часі значень шляхом інтерполяції. Точність відновлення обмежена помилкою квантування. Однак відповідно до теореми Котельникова-Шеннона точне відновлення амплітуди можливо, тільки якщо частота дискретизації вище, ніж подвоєна максимальна частота в спектрі сигналу. Оскільки реальні АЦП не можуть зробити аналого-цифрове перетворення миттєво, вхідне аналогове значення має утримуватися постійним, по крайній мірі, від початку до кінця процесу перетворення. Необхідно встановити при яких значеннях параметра фільтра похибка перетворення буде мінімальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Огляд та порівняльний аналіз схем АЦП показав, що при прийомі аналогового сигналу при перетворенні в цифровий код велике значення має його якісний прийом, у цьому випадку доречним є використання

ФНЧ від низькочастотних шумів та інших перешкод, які впливають на його якість. Сучасні схемні рішення каналів аналого-цифрового перетворення виконуються як з зовнішніми ФНЧ, так і вбудованими в апаратну частину мікросхем. Прикладом таких мікросхем є продукція лідера сучасного ринку АЦП фірми Analog Devices [2]. Центральною проблемою виміральної техніки залишається проблема захисту від перешкод в ІВС. Система зв'язку повинна бути спроектована так, щоб вона була здатна найкращим чином протистояти дії перешкод.

Мета статті. Дослідження створеного методу перетворення аналогової інформації в цифрову з застосування сучасної елементної бази. На основі проведених досліджень надати рекомендації щодо використання запропонованих методів перетворення.

Результати досліджень. Цифрові ФНЧ мають важливе значення для функціонування АЦП, які ґрунтуються на передискретизації сигналу для виносу шуму квантування за межі спектра. Існує кілька типів цифрових фільтрів, які використовуються АЦП, які забезпечують різні переваги і недоліки, для використання в різних додатках. Структурна схема каналу обробки таких сигналів інформаційно-виміральної системи приведена на рисунку 1.

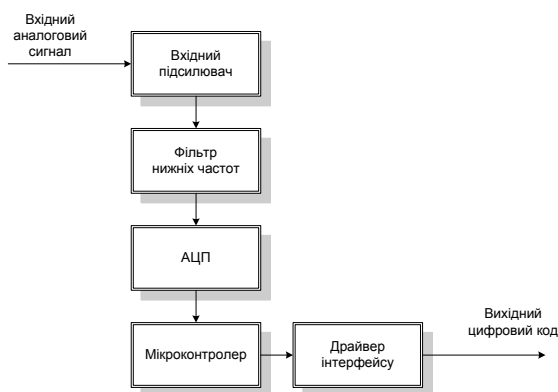


Рис. 1. Структурна схема системи для дослідження похибки компонентів ІВС

Похибки перетворення кожного з компонентів каналу обробки можна умовно розділити на статичні і динамічні похибки. Статичні похибки основних компонентів ІВС включають адитивну складову похибки перетворення, мультиплікативну складову похибки перетворення, для АЦП також необхідно враховувати складові, обумовлені диференціальною нелінійністю, інтегральною нелінійністю і похибкою квантування [3]. При побудові ІВС, що здійснюють обробку таких сигналів, також необхідно враховувати вплив шуму, викликаного впливом електромагнітних перешкод на кабель, що з'єднує датчик з входом каналу обробки, а також на інші компоненти системи. Основними способами зниження впливу даного впливу на якість обробки сигналів, які змінюються повільно, в тому числі на похибку перетворення компонентами ІВС, є:

- використання пасивних фільтрів на вході каналу обробки;
- використання активних фільтрів на вході АЦП;
- застосування алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) з подальшою цифровою обробкою.

Для визначення впливу частоти зрізу ФНЧ на вході АЦП на основну похибку компонентів каналу обробки аналогових сигналів ІВС розроблена система, згідно структурній схемі, зображеній на рисунку 2.



Рис. 2. Структурна схема визначення впливу частоти зрізу ФНЧ

Як джерело напруги використаний імітатор резистивних датчиків типу ВТ4048, як вольтметрів 1, 2 - мікроомметр AGILENT TECHNOLOGIES 34420A. Для чистоти експерименту до обох точкам схеми підключався один і той же прилад.

Для визначення похибки перетворення АЦП до мікроконтролера підключався ПК за допомогою інтерфейсу RS-485. Вхідний підсилювач реалізований на операційному підсилювачі (ОУ) типу 140УД1701. Проведено дві серії експериментів з різними типами ФНЧ і АЦП. У першому випадку фільтр був реалізований на мікросхемі типу 1478ФН2У, що є фільтром нижніх частот восьмого порядку, в якості керуючого мікроконтролера - мікросхема С8051F410 з використанням вбудованого аналого-цифрового перетворювача. У другому випадку в якості АЦП була використана мікросхема AD7714, що має вбудований фільтр нижніх частот, для управління АЦП використовувалася ПЛІС типу ХСR3128XL-VQ100. При проведенні експерименту на вхід підсилювача з коефіцієнтом підсилення 20 подавалась стабілізована напруга 100 мВ, контрольована вольтметром 1, коефіцієнт підсилення вхідного підсилювача контролювався за допомогою вольтметрів 1 і 2. Частота зрізу ФНЧ на основі мікросхеми типу 1478ФН2У програ-

мувались за допомогою установки частоти тактування даної мікросхеми керуючим МК. Частота зрізу ФНЧ, вбудованого в мікросхему типу AD7714, задавалася за допомогою запису певних значень у відповідні регістри управління даної мікросхеми керуючої ПЛІС типу XCR3128XL-VQ100. Отримані значення основної похибки перетворення компонентів каналу обробки сигналів ІВС, що змінюються повільно, в приміщенні з нормальною електромагнітною обстановкою зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Основна похибка перетворення компонентами ІВС

Тип АЦП	Похибка вхідного підсилювача, %	Похибка ФНЧ, %	Похибка АЦП, %	Похибка системи, %
Вбудований, Мікроконтр. С8051F410	0,0014	0,034	0,024	0,025
AD7714	0,0014	-	0,014	0,015

Похибка перетворення фільтра нижніх частот в другій серії експериментів визначити неможливо, оскільки ФНЧ є складовою частиною АЦП типу AD7714 і його вихід не підключений ні до одного з контактів корпусу. Отримані залежності адитивної складової похибки перетворення АЦП від частоти зрізу ФНЧ показують її збільшення зі збільшення частоти. Крім того, встановлено, що в разі використання АЦП типу AD7714 ймовірність успішного запуску АЦП залежить від частоти зрізу вбудованого ФНЧ і частоти тактування АЦП. Зазначена залежність підтверджена проведенням експерименту з використанням 10 примірників мікросхеми типу AD7714 з трьох різних партій і трьох екземплярів керуючої ПЛІС. У всіх випадках при частоті тактування нижче 2 МГц і частоті зрізу від 80 до 110 Гц АЦП міг запускатися самостійно тільки в 80% випадків. При частоті зрізу від 40 до 80 Гц АЦП міг не запускатися. При частоті зрізу нижче 40 Гц АЦП не працював, рідко (менше 10% випадків) запускався самостійно. Ініціалізація АЦП у всіх випадках проходила нормально. Встановлено, що стабільний запуск АЦП даного типу з частотою зрізу вбудованого ФНЧ нижче 110 Гц можливий тільки при частоті тактування вище 2 МГц.

Часто аналогові сигнали містять небажаний високочастотний шум. Щоб "очистити" сигнал від цих шумів застосовуються аналогові RC-фільтри низьких частот, які встановлюються після джерела сигналу. Такий підхід не завжди ідеальний і практичний. Наприклад, для великих постійних часу потрібні великі значення R і C. В якості альтернативи, можна "очистити" зашумлений сигнал за допомогою цифрового еквівалента аналогового RC-фільтра нижніх частот.

При проведенні дослідження встановлено, що при побудові інформаційно-вимірювальних систем, що здійснюють цифрову обробку аналогових сигналів для отримання значення адитивної складової похибки перетворення на рівні 4-5 одиниць молодшого

розряду, необхідно використання фільтра нижніх частот, включеного в тракт проходження аналогового сигналу перед АЦП з частотою зрізу не вище 100 Гц. Рекомендується тактування АЦП даного типу частотою не нижче 2 МГц (оптимально значення 2,4576 МГц, що може бути нездійснено при використанні деяких типів МК і ПЛІС. У такому випадку для досягнення прийняттого значення адитивної складової похибки аналого-цифрового перетворення при використанні АЦП даного типу рекомендується підвищення частоти зрізу до 110-120 Гц при зниженні частоти тактування до 1МГц.

В даний час широко використовуються методи обробки сигналів за допомогою мікроелектронних обчислювальних пристроїв і систем. В сучасних ІВС у якості дискретних пристроїв обробки сигналів застосовуються лінійні стаціонарні цифрові фільтри. Виконуючи, подібно аналоговим ланцюгам, операцію частотної фільтрації, цифрові фільтри (ЦФ) мають ряд суттєвих переваг. Сюди відносяться, наприклад, висока стабільність параметрів, можливість отримувати самі різноманітні форми АЧХ і ФЧХ. Цифрові фільтри не потребують налаштування і легко реалізуються на ПК програмними методами. На рисунку 3 наведена основна структурна схема цифрової обробки сигналів.

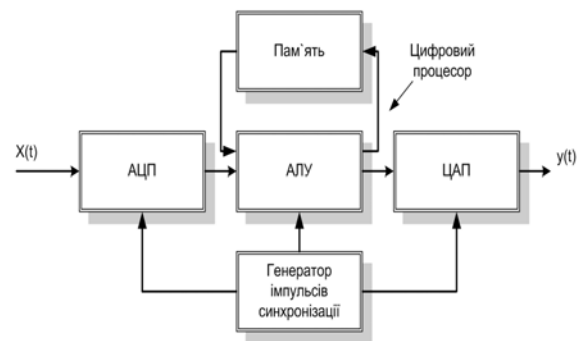


Рис. 3. Структурна схема цифрової обробки безперервних сигналів

Безперервний вхідний сигнал $x(t)$ надходить в АЦП, керований синхроімпульсами від генератора, що задає частоту дискретизації. У момент подачі синхроімпульсу на виході АЦП виникає сигнал, що відображає результат вимірювання миттєвого значення вхідного коливання у вигляді двійкового числа з фіксованою кількістю розрядів. Залежно від особливості побудови пристрою цього числа відповідає або послідовність коротких імпульсів (передача у послідовному коді), або сукупність рівнів напруг на сигнальних шинах окремих розрядів (передача в паралельному коді). Перетворений таким чином сигнал надходить в основний блок пристрою, так званий цифровий процесор, що складається з арифметичного пристрою і пристрою пам'яті.

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій методи цифрової фільтрації математично, теоретично та практично добре опрацьовані. Циф-

рові фільтри дозволяють здійснювати фільтрацію з високою точністю. У основі більшості методів цифрової фільтрації лежить операція згортки. Цифрові фільтри – це точні фільтри в частині прогнозування і досягнення потрібного спектру вихідного сигналу. Кожен окремих тип цифрових фільтрів має свої плюси і свої мінуси, однак в цілому цифрова фільтрація несумірне точніша, ніж аналогова [4].

До основних переваг аналогових фільтрів можна віднести швидкість фільтрації. По цьому критерію цифрова фільтрація програє аналоговою. Якщо швидкість цифрової фільтрації для різних цифрових фільтрів різна і залежить у великій мірі від типу фільтру, від його параметрів і параметрів фільтрованого сигналу, то швидкість аналогової фільтрації практично визначається затримками в розповсюдженні сигналів, що завжди забезпечує режим реального часу. Важливим плюсом аналогової фільтрації є широкий динамічний діапазон аналогових фільтрів (як по амплітуді, так і по частоті) у порівнянні з цифровими фільтрами. Чим вище робочий частотний діапазон цифрового фільтру, тим більше високі вимоги пред'являються до параметрів перетворення сигналу (АЦП), що, відповідно, позначається на об'ємах даних, які необхідно переробити цифровому фільтру, а значить, і на швидкості фільтрації [5]. У аналоговій же апаратурі робота з високими частотами лише підвищує вимоги до елементної бази, але при цьому практично не позначається на швидкості.

Проблеми, що виникають при виборі схеми фільтру нижніх частот, пов'язані з суперечливістю вимог щодо характеристик фільтру. Це можна пояснити на прикладі простого пасивного фільтру нижніх частот (рис. 4).

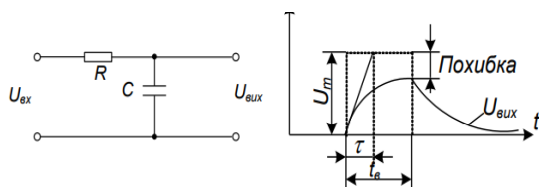


Рис. 4. Пасивний фільтр нижніх частот і його реакція на імпульс

Реакція фільтру на імпульсний вхідний сигнал $U_{вх}$ згідно теорії перехідних процесів, визначається формулою:

$$U_{вх} = U_m(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

де $\tau = RC$ – стала часу.

На підставі (1) можна визначити, що відносна похибка вимірювань системи в кінці часу вибірки дорівнює:

$$\delta = e^{-t_0/\tau} \quad (2)$$

Отже, відносна похибка залежить від співвідношення t_0/τ .

З метою розгляду конкретного прикладу щодо вибору пасивного низькочастотного фільтру нижче наведені його чисельні значення (табл. 1).

Таблиця 2

Чисельні значення низькочастотного фільтру							
$\delta, \%$	10	5	1	0,5	0,1	0,05	0,0
t_0/τ	2,3	3,0	4,61	5,3	6,91	7,6	9,21

З наведених обчислень видно, що при допустимій похибці $\delta \leq 1\%$ час вибірки t_0 повинен перевищувати в 4,61 разів сталу часу фільтру.

Таким чином, питання про застосування аналогової або цифрової фільтрації в загальному випадку не має однозначної відповіді, для кожного конкретного випадку цей вибір є індивідуальним. Проте, відзначимо, що цифрова фільтрація є, без сумніву, набагато більш універсальною і точною, чим аналогова, а з постійним зростанням обчислювальних потужностей вона стає все більш і більш доступною для застосування у всіх областях [6]. Для моделювання впливу параметра фільтру обрано перетворення сигналу від датчика 2,5 В. Значення напруги відповідає 25% шкали діапазону виміру. При 12-розрядному АЦП цифровий код на виході АЦП має значення 1024. Значення параметра фільтру змінюється в діапазоні від 0,3 до 1,0. Перетворення аналогового сигналу в цифровий код здійснюється по наступному алгоритму [7]. Прийнятий з АЦП цифровий код перевіряється на допустимість: якщо $x \leq 0$, то $x=0$; якщо $x \geq 4096$, то $x=4096$ та розраховується по формулі:

$$Z = F \cdot x + (1-F) \cdot G, \quad (3)$$

де x – значення коду після фільтру в діапазоні 0-4096, що вводиться з АЦП (12 розрядів);

F – параметр фільтру (0,3 – 1);

G – значення параметру після фільтру попереднього кроку, (початкове значення $G = 1000$).

Розрахунок значення в одиницях параметру виміру виконується по формулі [7]:

$$Y = A + (R - A) \cdot \frac{z}{4096}, \quad (4)$$

де R – максимум діапазону виміру (в одиницях виміру фізичної величини), 10В;

A – мінімум діапазону виміру (в одиницях виміру фізичної величини), 0В.

На рисунку 5 наведено результати моделювання залежності вихідної напруги для різних значень параметра фільтру.

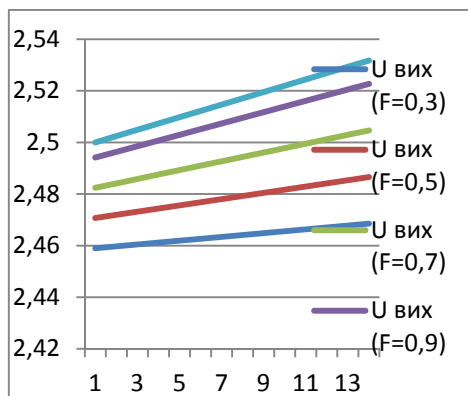


Рис. 5. Графік залежності вихідної напруги від параметра фільтра

Цифровий код в залежності від параметра фільтра змінюється в діапазоні від 2,458984 В ($F=0,3$) до 2,5 В ($F=1,0$).

Висновки. Модель фільтрації сигналів та її дослідження показала, що процедура нормалізації сигналів передбачає повне або часткове усунення впливу перешкод при одночасній обробці інформаційної частини сигналу. Параметри фільтра і, як наслідок, його характеристики залежать від місця включення фільтра по відношенню до комутаційного пристрою.

Специфіка визначення середніх і сумарних значень при обробленні аналогових сигналів обумовлена дискретним характером вхідної інформації. З цією метою в ланцюжку прийому аналогового сигналу запропоновано використати програмний модуль фільтрації та представлений алгоритм фільтрації аналогового сигналу, який забезпечує обчислення середнього значення останніх n -значень.

Література

1. Михайло Паламар. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/28670/1/Проектування%20комп'ютеризованих%20вимірювальних%20систем%20і%20комплексів.pdf> (дата звернення 08.12.2020).
2. Analog Devices. AD7557 Converter. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://datasheetspdf.com/pdf/544313/AnalogDevices/AD7550/1> (дата звернення 11.12.2020).
3. Кардашук В.С. Розробка алгоритмів керування технологічними процесами з використанням бібліотеки програмного забезпечення алгоритмічних елементів / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Северодонецьк, 2019. – № 5 (253). – С. 47-49.
4. Kardashuk V. Design of Algorithms for Technological Processes Control / Theoretical and Applied Computer Science and Information. Technology III International Conference TACSIT-2019, Proceedings. May 7-8, 2019, Severodonetsk, 2019. – P. 16-17.
5. Рязанцев О.І., Кардашук В.С., Бортник К.Я. Застосування програмної бібліотеки алгоритмічних елементів для проектування технологічних схем промислової ав-

томатизації / Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – № 23. – С. 98-104.

6. Рязанцев О.І., Кардашук В.С. Керування технологічним процесом знешкодження відходів хлорорганічного синтезу в умовах невизначеності параметрів / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – № 10 (217), 2014. – С. 54 – 58.
7. Кардашук В.С., Ключкіна О.С. Методика виміру аналогових сигналів в мікропроцесорних системах / «Майбутній науковець-2015». Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції. 4 грудня 2015р. – Северодонецьк. – С. 70-72.

Reference

1. Mikhail Palamar. Design of computerized measuring systems and complexes. Tutorial. [Electronic resource]. - Access mode: <http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/28670/1/Design%20computerized%20measuring%20systems%20and%20complexes.pdf> (access date 08.12.2020).
2. Analog Devices. AD7557 Converter. [Electronic resource]. - Access mode: <https://datasheetspdf.com/pdf/544313/AnalogDevices/AD7550/1> (access date 11.12.2020).
3. Kardashuk VS Development of algorithms for managing technological processes using a library of software for algorithmic elements / Bulletin of the East Ukrainian National University. Vladimir Dahl. - Severodonetsk, 2019. - № 5 (253). - P. 47-49.
4. Kardashuk V. Design of Algorithms for Technological Processes Control / Theoretical and Applied Computer Science and Information. Technology III International Conference TACSIT-2019, Proceedings. May 7-8, 2019, Severodonetsk, 2019. - R. 16-17.
5. Ryazantsev OI, Kardashuk VS, Bortnik K.Ya. Application of software library of algorithmic elements for designing technological schemes of industrial automation / Computer-integrated technologies: education, science, production. - Lutsk: LNTU, 2016. - № 23. - P. 98-104.
6. Ryazantsev OI. Kardashuk VS Management of technological process of waste disposal of organochlorine synthesis in conditions of uncertainty of parameters / Bulletin of the East Ukrainian National University. In Dahl. - № 10 (217), 2014. - P. 54 - 58.
7. Kardashuk VS, Klyutkina OS Methods of measuring analog signals in microprocessor systems / "Future Scientist-2015". Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical conference. December 4, 2015 - Severodonetsk. - P. 70-72.

Рязанцев А.И., Кардашук В.С., Рязанцев А.А. Исследование влияния параметра фильтра на качество аналого-цифрового преобразования сигнала.

В статье исследовано влияние параметра фильтра нижних частот, частоты среза и порядка фильтра на входе аналого-цифрового преобразователя на основную погрешность преобразования при обработке аналоговых сигналов. Определено, что при приеме аналогового сигнала при преобразовании в цифровой код большое значение имеет его качественный прием. В этом случае уместно использование ФНЧ от низкочастотных шумов и других помех, которые вливают на его качество. Установлено, что снижение частоты среза фильтра нижних частот уменьшает уровень аддитивной составляющей погрешности, но при этом в некоторых случаях также снижает

ется стабильность работы системы. Отмечено, что использование цифрового фильтра повышает точность и скорость преобразования аналоговой информации в цифровой код. Определено, что процедура нормализации сигналов предусматривает полное или частичное устранение влияния помех при одновременной обработке информационной части сигнала. Параметры фильтра и его характеристики зависят от включения фильтра по отношению к коммутационному устройству. Рассмотрены современные высокопроизводительные устройства ввода/вывода цифровой обработки информации, которые конструктивно выполняются в виде модулей ввода аналоговой информации для создания комплексов на базе персональных компьютеров или микроконтроллеров. Для моделирования приема аналогового сигнала предложено использовать блоки, программные модули и алгоритм работы из библиотеки программных алгоритмических элементов обработки аналогового сигнала. Представлены результаты моделирования цифрового фильтра. Для моделирования избрано преобразование сигнала от датчика напряжения. Преобразования напряжения в цифровой код осуществлялось для 12-разрядного АЦП. Значение параметра фильтра менялось в диапазоне от 0,3 до 1,0. Результаты моделирования показывают, что для качественного преобразования аналогового сигнала в цифровой код необходима предварительная нормализация с последующей цифровой фильтрацией.

Ключевые слова: цифровой фильтр, аналого-цифровое преобразование, информационно-измерительная система, обработки сигналов, нормализация, погрешность.

Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Ryazantsev A.O.
Study of the influence of the filter parameter on the quality of analog-to-digital signal conversion.

The article investigates the influence of the low-pass filter parameter, cutoff frequency and filter order at the input of an analog-to-digital converter on the basic conversion error when processing analog signals. It has been determined that when receiving an analog signal during conversion into a digital code, its high-quality reception is of great importance. In this case, it is appropriate to use a low-pass filter from low-frequency noise and other interference that affects its quality. It was found that reducing the cutoff frequency of the low-pass filter reduces the level of the additive component of the error, but in some cases the stability of the system also decreases. It is noted that the use of a digital filter increases the accuracy

and speed of converting analog information into a digital code. It has been determined that the signal normalization procedure provides for complete or partial elimination of the influence of interference while processing the information part of the signal. The filter parameters and its characteristics depend on the inclusion of the filter in relation to the switching device. Considered are modern high-performance input / output devices for digital information processing, which are constructively implemented in the form of analog information input modules for creating complexes based on personal computers or microcontrollers. To simulate the reception of an analog signal, it is proposed to use blocks, software modules and an operating algorithm from the library of software algorithmic elements for processing an analog signal. The results of digital filter simulation are presented. The conversion of the signal from the voltage sensor was chosen for the simulation. Conversion of voltage to digital code was carried out for a 12-bit ADC. The filter parameter value varied from 0.3 to 1.0. The simulation results show that for a high-quality conversion of an analog signal into a digital code, preliminary normalization with subsequent digital filtering is required. To simulate the conversion of an analog signal into a digital code, it is proposed to use blocks, software modules and a processing algorithm from the library of algorithmic elements.

Keywords: digital filter, analog-to-digital conversion, information-measuring system, signal processing, normalization, conversion error.

Рязанцев О.І. – д.т.н, професор, проректор з науково – педагогічної роботи та міжнародної діяльності Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: a_ryazantsev@snu.edu.ua

Кардашук В.С. – к.т.н, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kardashuk@snu.edu.ua

Рязанцев А.О. – аспірант, асистент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: aspirant-26@snu.edu.ua

Стаття подана 18.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-35-39>

УДК 621.314

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ В СИСТЕМІ ГЕНЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Бєлоха Г.С.

FREQUENCY CONVERTER IN THE SYSTEM ENERGY GENERATION WIND TURBINES

Bielokha H.S.

В останній час системи перетворення енергії вітру збільшують своє проникнення в електричні мережі в майже усі країни світу. Інтеграція енергії вітру в енергетичні системи спричиняє проблему з точки зору якості електроенергії. У статті розглянуто електричну систему у складі вітрогенераторних установок зі змінною швидкістю обертання ротора, щоб отримати максимальну потужність із вітру. Показано основні задачі керування вітрогенераторних установок то зони роботи вітряків. Приведено огляд перетворювачів частоти. Запропоновано перетворювач частоти (AC-DC-AC) з ланкою постійного струму. До його складу входять вхідний AC/DC перетворювач, система управління якого та регулятор швидкості генератора забезпечують оптимальну передачу енергії від вітрогенератора, і вихідний DC/AC перетворювача, виконаного на базі активного випрямляча. Між вхідним інвертором і активним випрямлячем знаходиться ланка постійної напруги (конденсатор). Система керування такого перетворювача релейна. Таке керування забезпечує з релейним керування, дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання буде визначатися шириною петлі гістерезису релейних регуляторів. Таким чином забезпечується електромагнітна сумісність з мережею живлення. Представлено математичний опис електромагнітних процесів в активному випрямлячі та інверторі, які входять до складу перетворювача. За допомогою цифрового моделювання в програмі Matlab проведено дослідження режимів роботи (змінення напруги генератора, частоти струму генератора) та виконан аналіз струмів на вміст гармонік. Гармонійний аналіз показав, що запропонований перетворювач забезпечує хорошу якість споживаної енергії THD істотно менше 5% що задовольняє міжнародним стандартам на якість електроенергії.

Ключові слова: перетворювач частоти, активний випрямляч, вітроенергетична установка

Вступ. В останній час системи перетворення енергії вітру (вітроенергетичні установки (ВЕУ)) збільшують своє проникнення в електричні мережі

більшості країн, завдяки значному зменшенню затрат на виробництво енергії вітру, а також технологічних розробках у виробництві вітряків. Інтеграція енергії вітру в енергетичні системи спричиняє проблему з точки зору якості електроенергії та можливості усунення несправностей.

Щоб отримати максимальну потужність із вітру, швидкість ротора турбіни повинна бути змінена пропорційно швидкості вітру. Це вимагає роботи зі змінною швидкістю. Вітрові турбіни з регульованою швидкістю мають багато переваг у порівнянні з тими які працюють з фіксованою, такі як підвищене захоплення енергії, робота на максимальній потужності, підвищена ефективність і якість електроенергії. Застосування вітряних турбун з фіксованою швидкістю зазвичай не є кращим рішенням через їх низькі характеристики.

Електромеханічна система складається з вітроколеса (ротора), редуктора, що узгоджує частоту обертання вітроколеса і генератора, перетворювача, який забезпечує узгодження параметрів генерації генератором електроенергії до вимог електросистеми споживача.

Основні завдання управління ВЕУ:

- включення ВЕУ при швидкостях старту і відключення при граничних швидкостях;
- передача електричної енергії в мережу із заданою величиною потужності для широкого інтервалу швидкостей вітру;
- дотримання стандартів на якість електричної енергії (сучасні міжнародні стандарти на якість містять норми по гармонікам споживаного струму [1,2]).

Складність перетворювача залежить від типу застосовуваного генератора, потужності, рівня напруги і вимоги до електромагнітної сумісності з мережею живлення.

Перетворювачі застосовуються двох типів: перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (складаються з вхідного випрямляча як керованого так і ні, й вихідного інвертора, частота на виході якого може бути будь-якою) та безпосередні перетворювачі частоти (ціклоконвертор, який перетворює енергію змінного струму в змінний з вихідною частотою менше вхідної; або матричний перетворювач, який може управляти середньоквадратичним значенням напруги навантаження і може видавати будь-яку вихідну частоту) [3-6].

Аналіз публікацій показує що найбільш переважними для невеликих потужностей є перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, матричні для великої потужності

Мета статті. Розробка перетворювача частоти з ланкою постійної напруги для вітрогенераторних установок, та його дослідження.

Результати дослідження. Електрична підсистема складається з генератора, перетворювача потужності, фільтрів, і трансформатора. У генераторі механічна енергія перетворюється в електричну. Для вітроенергетики пропонується безліч типів генераторів, найбільш поширені індукційний генератор подвійного живлення (DFIG), синхронний генератор з постійними магнітами (PMSG) або індукційний генератор з короткозамкненим ротором (SCIG) [3,4].

Для вибору перетворювача необхідно визначити робочі режими установок.

Сучасні ВЕУ можуть мати два основних робочих режими це робота з постійною або змінною швидкістю обертання ротора вітроколеса, при цьому принципи управління ВЕУ залежать від того, в якій зоні вони працюють. Виділяють три основні зони роботи ВЕУ. Ці зони відзначені на енергетичній характеристиці (рисунок 1). [4].

ВЕУ працюють від швидкості відключення, як показано на рисунку. Уловлювання енергії збільшується в області змінної швидкості до тих пір, поки не буде досягнута робоча межа, потім кривизна згладжується під дією приводу кроку лопатей, і система працює з постійною швидкістю. Така система управління дозволяє виробляти максимально можливу потужність ВЕУ в режимі робочих вітрів і номінальну - в режимі обмежень, захищаючи генератор від перевантаження.

Найбільш часто використовуємим трифазним силовим перетворювачем в системах генерування електричної енергії для вітроенергетичних установок є дворівневий інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією [7,8]. ШІМ-управління забезпечує постійну частоту перемикання вентилів, але має суттєвий недолік складність розрахунку та налаштування регуляторів.

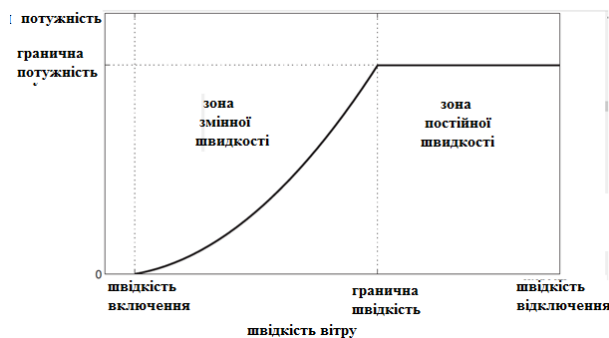


Рис. 1. Енергетична характеристика ВЕУ

У цьому дослідженні пропонується перетворювач частоти з релейним керуванням. Релейний принцип управління дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання буде визначатися шириною петлі гістерезису релейних регуляторів. У цьому випадку досягається істотне спрощення системи управління в порівнянні з ШІМ-управлінням.

Структурна схема системи вітроенергетики з запропонованим перетворювачем частоти наведена на рисунку 2. Механічна енергія вітра через редуктор передається на генератор, генератор через перетворювач АС-DC-АС під'єднаний до мережі, якщо він генерує енергію в неї, або під'єднаний до підключеного навантаження. Система управління таким перетворювачем складна, для ефективно роботи, управління кожним контуром здійснюється окремо і залежить від завдань покладених на них.

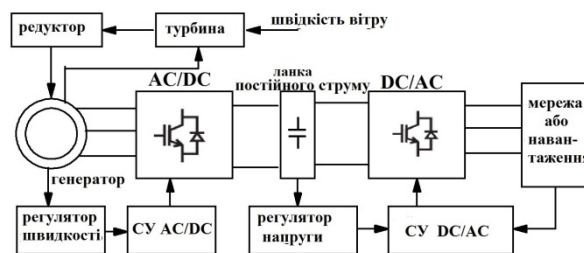


Рис. 2. Блок-схема енергетичної системи

Призначення регулятора напруги у ланці постійного струму полягає у збереженні напруги в його еталонному значенні для збереження працездатності перетворювача в цілому, якщо напруга зменшиться нижче ніж лінійна напруга фаз генератора, або мережі, порушиться його робота.

Перетворювач складається з двох контурів: АС/DC перетворювача, система управління якого та регулятор швидкості генератора забезпечують оптимальну передачу енергії від вітрогенератора, і вхідного DC/АС перетворювача, виконаного на базі активного випрямляча для забезпечення електромагнітної сумісності. Між вхідним інвертором і активним випрямлячем знаходиться ланка постійної напруги (конденсатор). На виході перетворювача не-

обхідно встановлювати дроселі, для формування необхідних струмів мережі.

На рисунку 3 представлена принципова схема силової частини перетворювача.

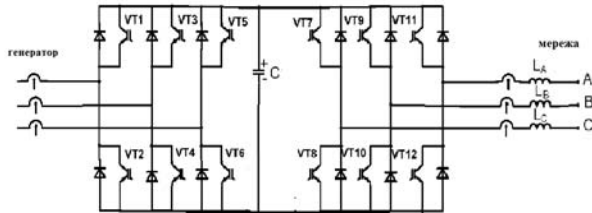


Рис. 3. Силова частина перетворювача

Вирази, які описують процеси в DC/AC при релейному регулюванні, для фази А:

$$i_{Az} - i_A = \Delta i_A$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + \alpha U_C, -a \leq \Delta i_A \leq a \quad \frac{di_A}{dt} > 0$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - \alpha U_C, -a \leq \Delta i_A \leq a \quad \frac{di_A}{dt} < 0$$

для фази В:

$$i_{Bz} - i_B = \Delta i_B$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B + \beta U_C, -a \leq \Delta i_B \leq a \quad \frac{di_B}{dt} > 0$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B - \beta U_C, -a \leq \Delta i_B \leq a \quad \frac{di_B}{dt} < 0$$

для фази С:

$$i_{Cz} - i_C = \Delta i_C$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C + \gamma U_C, -a \leq \Delta i_C \leq a \quad \frac{di_C}{dt} > 0$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C - \gamma U_C, -a \leq \Delta i_C \leq a \quad \frac{di_C}{dt} < 0$$

де U_C – напруга в ланці постійного струму;

u_A, u_B, u_C – миттєві значення фазних напруг,

i_{Az}, i_{Bz}, i_{Cz} та i_A, i_B, i_C – струми завдання та реальні їх значення у фазах;

L_A, L_B, L_C – індуктивності фазних дроселів;

R_A, R_B, R_C – активні опори фазних дроселів;

$2a$ – ширина петлі гістерезису релейних регуляторів;

α, β, γ – коефіцієнти розподілення напруги U_C по фазам перетворювача [9].

Процеси які описуються в AC/DC для фаз А, В, С відповідно:

$$i_{az} - i_a = \Delta i_a$$

$$L_{ag} \frac{di_a}{dt} + i_a R_{ag} = \alpha U_C, -a \leq \Delta i_a \leq a \quad \frac{di_a}{dt} > 0$$

$$L_{ag} \frac{di_a}{dt} + i_a R_{ag} = -\alpha U_C, -a \leq \Delta i_a \leq a \quad \frac{di_a}{dt} < 0$$

$$i_{bz} - i_b = \Delta i_b$$

$$L_{bg} \frac{di_b}{dt} + i_b R_{bg} = \beta U_C, -a \leq \Delta i_b \leq a \quad \frac{di_b}{dt} > 0$$

$$L_{bg} \frac{di_b}{dt} + i_b R_{bg} = -\beta U_C, -a \leq \Delta i_b \leq a \quad \frac{di_b}{dt} < 0$$

$$i_{cz} - i_c = \Delta i_c$$

$$L_{cg} \frac{di_c}{dt} + i_c R_{cg} = \gamma U_C, -a \leq \Delta i_c \leq a \quad \frac{di_c}{dt} > 0$$

$$L_{cg} \frac{di_c}{dt} + i_c R_{cg} = -\gamma U_C, -a \leq \Delta i_c \leq a \quad \frac{di_c}{dt} < 0$$

де i_{az}, i_{bz}, i_{cz} та i_a, i_b, i_c – струми завдання та реальні їх значення у фазах;

L_{ag}, L_{bg}, L_{cg} – індуктивності фаз генератора;

R_{ag}, R_{bg}, R_{cg} – активні опори фаз генератора.

Дослідження проводилось цифровим моделюванням у Matlab/Simulink. Рис. 4 демонструє змінення струму генератора, та змінення його частоти з 125 Гц до 25 Гц, при цьому у струмі який протікає в мережі виникає перехідний процес при зміненнях в AC/DC перетворювачі. Струм з мережі синусоїдальний, в протифазі з напругою, оскільки енергія віддається в мережу.

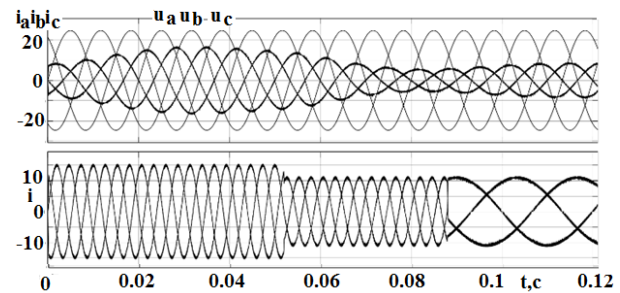


Рис. 4. Результати моделювання

Рисунок 5 демонструє змінення напруги генератора, при цьому струм мережі також змінив своє значення, в даному випадку зменшився.

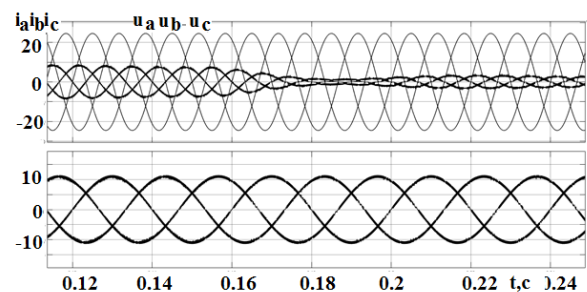


Рис. 5. Результати моделювання при зміні напруги

На рис 6 представлено результати аналізу струму на гармонійні складові.

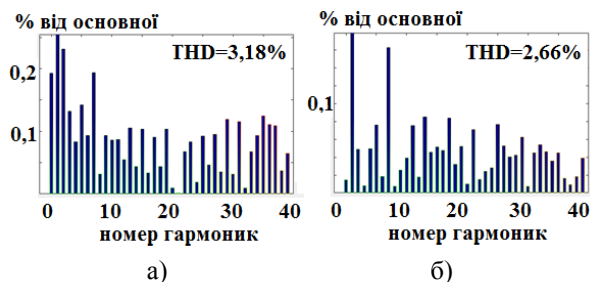


Рис. 6. Гармонійний склад струмів мережі (а) та генератора (б)

THD струму мережі складає 3,18%, що задовольняє міжнародним стандартам на якість електроенергії [1,2].

THD струму генератора складає 2,66%, висока якість струму збільшує тривалість експлуатації генератора, не призведе до перегрівання кабелів.

Висновки. Перетворювач частоти струму забезпечує електромагнітну сумісність з мережею завдяки активному випрямлячу в його складі, AC/DC перетворювач забезпечує можливість регулювання частоти та струму, и може бути використаний у вітроенергетичних установках. .

Результати моделювання показують можливість використання перетворювача з релейним керування у вітроенергетичних установках.

Гармонійний аналіз показав, що запропонований перетворювач забезпечує хорошу якість споживаної енергії. THD істотно менше 5% встановлених стандартом.

Література

1. CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
2. IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems., W.: JSC, 1992., 65 p.
3. Poopak Rozhanfekr: Energy-efficient Generating System for HVDC Off-shore Thesis / Poopak Rozhanfekr: Sweden 2013
4. Llu'is Trilla Romero: Power converter optimal control for wind energy conversion systems. Thesis Barcelona, 2013
5. Kotb B. Tawfiq, Arafa S. Mansour, Haitham S. Ramadan, Mohamed Becherif, E.E. El-kholy, Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review, Energy Procedia, Volume 162, 2019, Pages 38-47.
6. Y. Oğuz, İ. Güney and H. Çalık, "Power quality control and design of power converter for variable-speed wind energy conversion system with permanent-magnet synchronous generator", *The Scientific World Journal*, 2013.
7. Rodriguez J. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives / J. Rodriguez, S. Bernet, Wu Bin, J. O. Pontt, S. Kouro // IEEE Transactions on Industrial Electronics..vol. 54, no. 6, P. 2930-2945, 2007.
8. Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron., 2013. – vol. 28 – P. 176–198.

9. Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева. Алчевск: ДонГУ, 2013. – 219 с.

References

1. CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
2. IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems., W.: JSC, 1992., 65 p.
3. Poopak Rozhanfekr: Energy-efficient Generating System for HVDC Off-shore. Thesis: Sweden 2013.
4. Llu'is Trilla Romero: Power converter optimal control for wind energy conversion systems. Thesis Barcelona, 2013
5. Kotb B. Tawfiq, Arafa S. Mansour, Haitham S. Ramadan, Mohamed Becherif, E.E. El-kholy, Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review, Energy Procedia, Volume 162, 2019, pp 38-47.
6. Y. Oğuz, İ. Güney and H. Çalık, "Power quality control and design of power converter for variable-speed wind energy conversion system with permanent-magnet synchronous generator", *The Scientific World Journal*, 2013.
7. Rodriguez J. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives / J. Rodriguez, S. Bernet, Wu Bin, J. O. Pontt, S. Kouro // IEEE Transactions on Industrial Electronics..vol. 54, no. 6, P. 2930-2945, 2007.
8. Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron., 2013. – vol. 28 – P. 176–198.
9. Vysokoeffektivnyye istochniki elektropitaniya: Monografiya / Yu. P. Samcheleyev, V. G. Dryuchin, G. S. Belokha., N. I. Andreyeva. Alchevsk: DonGTU. 2013. 219 p/

Белоха Г.С. Преобразователь частоты в системе генерирования энергии ветроэнергетических установках

В последнее время системы преобразования энергии ветра увеличивают свое проникновение в электрические сети в почти все страны мира. Интеграция энергии ветра в энергетические системы вызывает проблему с точки зрения качества электроэнергии. В статье рассмотрено электрическую систему в составе ветрогенераторных установок с переменной скоростью вращения ротора, чтобы получить максимальную мощность ветра. Показаны основные задачи управления ветрогенераторных установок то зоны работы ветряков. Приведены обзор преобразователей частоты. Предложено преобразователь частоты (AC-DC-AC) со звеном постоянного тока. В его состав входят входной AC / DC преобразователь, система управления которого и регулятор скорости генератора обеспечивают оптимальную передачу энергии от ветрогенератора, и выходной DC / AC преобразователя, выполненного на базе активного выпрямителя. Между входным инвертором и активным выпрямителем находится звено постоянного напряжения (конденсатор). Система управления такого преобразователя релейная. Такое управление обеспечивает с релейным управлением, позволяет обеспечить практически мгновенную реакцию на отклонение от задания. Точность воспроизведения (отслеживание) сигнала задания будет определяться

шириной петли гистерезиса релейных регуляторов. Таким образом обеспечивается электромагнитная совместимость с питающей сетью. Представлены математическое описание электромагнитных процессов в активном выпрямителе и инверторы, которые входят в состав преобразователя. С помощью цифрового моделирования в программе Matlab проведено исследование режимов работы (изменение напряжения генератора, частоты тока генератора) и выполнен анализ токов на содержание гармоник. Гармонический анализ показал, что предложенный преобразователь обеспечивает хорошее качество потребляемой энергии THD существенно менее 5% удовлетворяющий международным стандартам на качество электроэнергии.

Ключевые слова: преобразователь частоты, активный выпрямитель, ветроэнергетическая установка

Bielokha H.S. Frequency converter in the system energy generation wind turbines

Wind power systems have increased their penetration into electrical grids in recent years. One of the interesting renewable energy sources for generation of electrical power is wind. Modern wind turbine based energy sources use power converters to enhance their performance and range of operation. The article discusses the electrical system in the structure of the wind energy conversion systems (WECS) with variable rotor speed. The wind energy conversion system is a complex system that converts wind energy to mechanical energy and then electric energy. The electrical subsystem comprises the generator, the three phase power converter, the filters and line inductances or the transformer. This article introduces the simulation and control of the three phase AC-

DC-AC (frequency converter). Frequency converter consist of two subsections: AC-DC (two-level active rectifier) and DC-AC (two-level voltage source inverter) with DC link and hysteresis current control. The control system can be split in three parts: speed control, machine-side converter (AC-DC) control, and grid-side converter (DC-AC) control. The controlled rectifier gives the bidirectional power flow capability, which is not possible in the diode rectifier based power conditioning system. A mathematical model of three-phase voltages and currents AC-DC and DC-AC with hysteresis current control is presented. AC-DC rectifier supply its load and at the same time compensate for AC grid current harmonics of neighborhood nonlinear loads. Frequency converter is electromagnetically compatible with the network. With the active rectifier, the generator torque can be fully controlled and the terminal voltage adjusted within certain limits. In this study, dynamic simulation and control of a wind turbine with the proposed frequency converter is done using MATLAB/Simulink. Simulation results show that the output current, voltage and frequency reach the desired operating values. The total harmonic distortion (THD) of current in generator 3,18%, in load less 3%, which meets the standards international for the quality of electricity.

Keywords: frequency converter, active rectifier, wind turbine

Бєлоха Г.С. – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, pointage13@gmail.com

Стаття подана 20.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-40-43>

УДК 504.064

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ

Мелконова І.В., Романченко Ю.А., Співак О.М.

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF INDUSTRIAL EMISSIONS

Melkonova I.V., Romanchenko J.A., Spivak O.M.

Моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря проводиться з метою отримання, збирання, оброблення, збереження та аналізу інформації про рівень забруднення атмосферного повітря, оцінки та прогнозування його змін і ступеня небезпечності та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень у галузі охорони атмосферного повітря. У статті запропоновано комплексне технічне рішення щодо забезпечення автоматизованого моніторингу промислових викидів в атмосфері, що включає в себе технічні засоби вимірювання та інформаційні технології.

Ключеві слова: екологія, автоматизовані системи, промислові викиди.

Вступ. Сучасний стан забруднення атмосфери є серйозною екологічною проблемою, яка негативно впливає на умови життя на Землі, здоров'я населення, у цілому на екосистеми й розвиток сільськогосподарських культур, призводить до несприятливих екологічних наслідків, таких, як закислення ґрунту та води, глобальне потепління, виснаження озонового шару тощо.

Останні десятиріччя характеризуються різким зростанням суспільної уваги до екологічних проблем і формуванням державної, а також і міждержавної природоохоронної політики. Найважливіше значення при цьому, як основа для прийняття рішень, має інвентаризація викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря.

Щороку по всій країні в атмосферу виділяється близько 17 млн. тон шкідливих речовин. Стан атмосферного повітря в Україні викликає занепокоєність екологічних організацій та медиків. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я забруднення повітря є основним екологічним чинником збільшення захворюваності та смертності у світі. За цим показником серед лідерів уже не один рік є Україна. І, як наслідок, маємо високий відсоток захворюваності на різні хвороби.

Так за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я Україна є одним із лідерів серед країн світу за кількістю смертей від забрудненого повітря в перерахунку на 100 тисяч осіб. Брудне повітря щороку відбирає життя щонайменше 60 тисяч українців.

Загалом найбільшу частку всіх забруднювальних речовин в Україні виділяють енергетика та промисловість - більше 60 %; за даними за 2018 рік з 10 найбільших підприємств, що забруднюють атмосферне повітря, 5 підприємств - ТЕС і ТЕЦ. Також удесятьці 4 металургійні комбінати та 1 шахта. Та головним джерелом забруднення атмосферного повітря в масштабі країни залишаються ТЕС і ТЕЦ, значна частина з яких працює на вугіллі - одному з найбільш екологічно небезпечних енергоносіїв [1].

Серед областей найбільшими забруднювачами довкілля є Донецька, Дніпропетровська та Запорізька області, в основному через концентрацію енергетичних та металургійних підприємств. Найменше викидів зафіксовано у Волинській, Чернівецькій та Закарпатській областях.

За даними Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського оцінка стану забруднення атмосферного повітря в містах України протягом I півріччя 2019 року здійснювалася за показниками спостережень у 39 містах на 129 стаціонарних постах державної системи моніторингу гідрометслужби [1].

Постановка проблеми. Екологічні проблеми на Україні стоять гостро, і скільки б їх не вирішували, рівень забруднення навколишнього середовища залишається дуже високим. Досить сказати, що тільки 5% території країни визнаються експертами екологічно чистими, а 70% ставляться до територій вкрай забруднених і навіть перебувають на межі екологічної катастрофи.

Створення системи моніторингу достовірного контролю за забрудненням атмосфери і джерелами викидів є однією з найважливіших екологічних про-

блем, спрямованих на усунення негативних наслідків впливу антропогенних забруднюючих речовин на навколишнє природне середовище та атмосферу зокрема.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науково-технічній літературі, та на багатьох наукових конференціях висловлюється багато ідей та їх реалізації з приводу автоматизації контролю промислових викидів. Дане питання досліджується фірмою "НПФ "ДИЕМ" яка займається створенням систем виробничого екологічного моніторингу для підприємств нафтогазохімічного комплексу [4], професором, д.т.н. С.В. Прокопчиною була розроблена концепція створення інформаційної системи для моніторингу і управління якістю атмосферного повітря [1], та іншими.

Мета статті. Метою роботи є розробка автоматизованої системи контролю промислових викидів в атмосферу, та зменшення забруднення повітря.

Результати дослідження. Основним напрямком вирішення пріоритетних аналітичних завдань є автоматизація спостереження за рівнем забруднення атмосферного повітря. Тільки такий шлях розвитку забезпечить достовірний і систематичний контроль якості атмосфери.

Очевидно, що автоматизованому контролю повинні підвергатися пріоритетні забруднювачі атмосфери, включені в міжнародну програму, глобальної системи моніторингу навколишнього середовища. У зв'язку з тим, що в нашій країні та області відсутні системи контролю промислових викидів, або дуже застарілі і вже не функціонують, розробка автоматизованої системи контролю промислових викидів в атмосферне повітря є вкрай необхідним.

Розробка системи контролю призначена для безперервного контролю вмісту забруднюючих речовин у викидах промислових підприємств, вимірювання метеорологічних параметрів, формування та передачі даних в центр збору, обробки та зберігання масивів даних про стан викидів.

Завдання, які повинні вирішатися системою контролю на промисловому підприємстві наступні:

- збір, обробка та зберігання інформації з датчиків контролю;
- екологічний аналіз інформації;
- вироблення управлінських рішень щодо зниження антропогенних впливів промислових підприємств на навколишнє середовище.

В умовах забруднення атмосфери створення автоматизованої системи контролю промислових викидів є дуже необхідним, але в той же час потребує багато матеріально-технічних витрат.

В ході вивчення цієї проблеми та її рішення можливе використання регуляризаційного байєсівського підходу, для створення автоматизованої системи контролю промислових викидів в атмосферне повітря. Перевага цього підходу полягає у його здатності забезпечувати отримання стійких оцінок і моделей в умовах малих вибірок, різнотипної інформації, значною неточності даних та нечіткості

знань про об'єкт управління (ОУ), умови управління (УУ) і зовнішньому середовищі. Як правило, в задачах математичного моделювання складних систем апріорних знань недостатньо, і залучають наявні експериментальні дані. У математичній постановці завдання моделювання ОУ, УУ і середовища, як і всього процесу прийняття рішень слід розглядати як некоректні обернені задачі відновлення модельної залежності за експериментальними даними, вимагають застосування регулюючих схем для забезпечення збіжності і стійкості їх рішень. [1]

У даній концепції для створення інформаційно-технологічної бази пропонуються можливості регуляризаційного байєсівського підходу (РБП) і технологій на його основі. Відмінною стороною методології на основі РБП, є її узагальнююча індуктивно-дедуктивна логіка, яка дозволяє розглядати об'єкт в системі середовища його функціонування, активно взаємодіє і розвивається разом з об'єктом, що забезпечує відображення всієї сукупності властивостей такої складної екосистеми, якою є виробничо - територіальний комплекс проекту. [1]

Автоматизована система контролю промислових викидів в атмосферу представляє сукупність органів контролю, які здійснюють комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на виконання вимог законодавства в галузі охорони атмосферного повітря, в тому числі на забезпечення дієвого контролю за виконанням планів і заходів з охорони атмосферного повітря, дотриманням нормативів гранично допустимих викидів або тимчасово узгоджених викидів і виконанням планів зниження викидів шкідливих речовин до встановлених нормативів.

Метою створення багатьох систем автоматизованих контролю промислових викидів в атмосферу є підвищення оперативності доставки інформації про фактичні викиди, підвищення її достовірності та забезпечення можливості динамічного регулювання викидів.

Автоматизована система контролю промислових викидів призначена для безперервного контролю вмісту забруднюючих речовин у викидах промислових підприємств, вимірювання метеорологічних параметрів, формування та передачі даних в центр збору, обробки та зберігання масивів даних про стан атмосферного повітря.

В основу запропонованої системи автоматизованого контролю промислових викидів було покладено такі основні принципи:

1. Безперервність роботи системи, та збір про стан атмосферного повітря
2. Стаціонарність - датчики контролю стану атмосферного повітря розробляються в автономному варіанті і після їх установки не змінюють своє місце положення;
3. Доступність обробленої інформації про ступінь забруднення атмосферного повітря в місцях розташування датчиків.

Об'єктом автоматизації є наступні процеси:

- вимірювання концентрації діоксиду сірки (SO₂) у викидах;
- вимірювання концентрації оксиду вуглецю (CO) у викидах;
- вимірювання концентрації вуглекислого та чадного газу (CO, CO₂) у викидах;
- вимірювання температури газу;
- розрахунку сумарних викидів по компонентах за вибраний проміжок часу.

Автоматизована система контролю промислових викидів складається з таких компонентів: автоматизованих постів контролю промислових викидів (газоаналізатора, дозиметр, приладу для вимірювання температури, манометра), станції збору даних (засоби зв'язку, сервер станції збору).

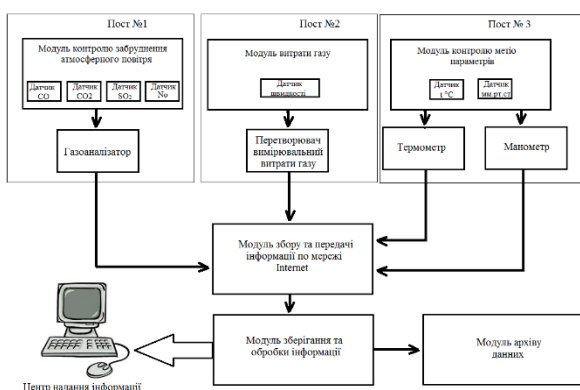


Рис. Автоматизована система контролю промислових викидів

При створенні системи автоматизованого контролю промислових викидів пропонується застосування модульного принципу побудови автоматизованої системи. Цей принцип є зручним для подальшого удосконалення системи та її використання на різних типах підприємств. Модульний принцип побудови тісно пов'язаний з регуляризаційним байєсівським підходом який дозволяє розглядати об'єкт в системі середовища та його функціонування.

Перший модуль контролю забруднення атмосферного повітря складається з датчиків вмісту речовин в повітрі CO, CO₂, SO₂, (та для потреби інших датчиків) та газоаналізатора. Модуль виконаний таким чином, що можливе використання інших датчиків в залежності від складу речовин, що забруднюють атмосферному повітрі

Другий модуль – це модуль витрати газу. Він містить датчик швидкості витрати газу, та перетворювач вимірювальний витрати газу. Цей модуль забезпечує контроль витрату газу в системі.

Третій модуль - контролю метео параметрів. В цьому модулі проводиться контроль температури за допомогою датчика температури та термометра та контроль тиску за допомогою датчика тиску та манометра.

З цих трьох модуль інформація подається на модуль збору та передачі інформації по мережі Internet. В цьому модулі збирається вся інформація

та передається в модуль зберігання та обробки інформації, цей модуль призначений для збору інформації про ступінь забруднення навколишнього середовища і формування каналу зв'язку для передачі інформації на модуль зберігання та обробки інформації. Потім інформація передається в модуль архів даних та центр надання інформації, модуль здійснює передачу даних за допомогою:

- мережі Internet
- по каналу зв'язку RS-232 (на відстань до 1500м)
- по радіоканалу (на відстань до 3000 м).

В запропонованій системі використовується передача даних за допомогою мережі Internet, це є необхідною умовою для даної системи, так як в сучасному світі можлива інформатизація людей, що до стану атмосферного повітря в зоні контролю. Також за допомогою мережі Internet можливо швидко повідомити про перевищення допустимої норми викидів в атмосферне повітря і швидке усунення цієї проблеми.

Програмне забезпечення центра збору даних дозволяє в режимі реального часу отримувати оперативну інформацію про величину забруднення атмосферного повітря, моделювати процеси забруднення атмосфери і відображати результати моделювання на екрані у вигляді полів концентрацій шкідливих речовин (мг/м³) або частках граничнодопустимих концентрацій, а також у вигляді діаграм, графіків і таблиць за бажанням користувача. В модулі архіву даних проводиться накопичення та архівування даних вимірювань і спостережень, інформаційний пошук і доступ до архівної інформації, аналіз і прогноз динаміки забруднень; управління режимами роботи системи.

Висновки.

Побудова системи забезпечує одержання великого обсягу інформації про стан атмосферного повітря. Система дозволяє змінювати інтервал вимірювання цих параметрів від 5 хвилин до однієї години. Дані відображаються на сервері і доступні для обробки. По закінченню року дані архівують і зберігають в електронному вигляді.

Література

1. Закон України „Про охорону навколишнього природного середовища” від 25 червня 1991 року// Відомості Верховної Ради України.- 1991 р.- № 41.- Ст. 546.
2. Система контролю содержания SO₂ и NO в выбросах предприятий: Проспект / «Смог».-1998.-Ужгород.
3. Бельдеева Л.Н. Экологический мониторинг: учебное пособие /АлтГТУ им. И.И.Ползунова. – Барнаул: издательство АлтГТУ 1999- 122 л.
4. Режим доступа: <http://www.energoneftegazhim.ru/node/128> ЗАО "НПФ "ДИЭМ" - создание систем производственного экологического мониторинга для предприятий нефтегазохимического комплекса (дата звернення 03.12.2020)
5. Прокопчина С.В. Создание развивающихся информационных технологий на основе регуляризирующего байесовского подхода.– Материалы Междунаро-

дной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM–2005».– СПб., 2005.

References

1. Zakon Ukrainy „Pro okhoronu navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha” vid 25 chervnya 1991 roku// Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy.- 1991 r.- № 41.- St. 546.
2. Sistema kontroly soderganiy SO2 i NO v vybrossah predpriyiy: Prospekt”Smog”.-1998.-Uzhgorod.
3. Beldeeva L.N Ekologicheskiy monitoring: uchebnoe posobie / AltGTU im. I.I Polzunova.- Barnaul: izdatelstvo AltGTU 1999- 122 l.
4. Rezhim dostupa : <http://www.energoneftegazhim.ru/node/128> ZAO “NPF “DIEM” - sozдание system proizvodstvennogo ekologicheskogo monitoringa dly predpriyiy neftegazozhimicheskogo kompleksa (data zvernennya: 03.12.2020).
5. Prokopchina S.V. Sozдание razvivayuschizhsya informacionnyh tezhnologiy na osnove regulyzirovanogo bayesinivskogo podzhoda – Materialy Megdunarodnoy konferenzzhii po mygkim vychesleniyam i izmereniyam «SCM–2005».– SPb., 2005.

Мелконова И.В., Романченко Ю.А., Спивак А.Н. Автоматизированная система контроля промышленных выбросов

Мониторинг в области охраны атмосферного воздуха проводится с целью получения, сбора, обработки, хранения и анализа информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха, оценки и прогнозирования его изменений и степени опасности и разработки научно обоснованных рекомендаций для принятия решений в области охраны атмосферного воздуха В статье предложен комплексное техническое решение по обеспечению автоматизированного мониторинга промышленных выбросов в атмосферу, включает в себя технические средства измерения и информационные технологии

Ключевые слова: экология, автоматизированные системы, промышленные выбросы.

Melkonova I.V., Romanchenko J.A., Spivak O.M. Automated control systems of industrial emissions

Monitoring in the field of atmospheric air protection is carried out with the aim of obtaining, collecting, processing, storing and analyzing information about the level of atmospheric air pollution, assessing and predicting its changes and the degree of danger and developing scientifically based rec-

ommendations for making decisions in the field of atmospheric air protection.

The purpose of protecting atmospheric air is to ensure the preservation of a favorable state of atmospheric air, its reproduction and improvement to support the environmental safety of human life, as well as prevent harmful effects on the natural environment. Emissions of pollutants into the atmospheric air from stationary sources can be carried out after obtaining a permit issued by specially authorized bodies. The list of institutions, organizations and institutions that are granted the right to develop documentation substantiating the volumes of emissions for enterprises, institutions, organizations and citizens that are subjects of entrepreneurial activity is determined by the specially authorized central executive body for environmental protection and environmental safety.

At present, constant monitoring of the environment at Ukrainian enterprises that pose an increased environmental hazard, unfortunately, is not widespread, while in the European Union it is mandatory. Currently, as part of the state monitoring system, the NPS practically does not have enterprise monitoring systems, since there are no regulatory documents in Ukraine that approve the mechanism for monitoring NPS and the provision of environmental data by enterprises. Thus, one of the directions for the further development of the oil pumping station monitoring system is the improvement of monitoring by Ukrainian enterprises. Due to these measures and the decline in production in the last few years, there has been a tendency to reduce the level of air pollution.

The task of improving the state monitoring system Atmospheric air is quite complex and multifaceted. One of the main necessary solutions is the re-equipment and renewal of material and technical base, new meteorological complexes that meet all world and modern requirements.

Keywords: ecology, automated systems, industrial emissions.

Мелконова І.В. – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, inna.mia.lg@gmail.com

Романченко Ю.А. – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, romanchenkojulia321123@gmail.com

Співак О.М. – к.т.н., доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій, alexspi@ukr.net

Стаття подана 21.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-44-48>

УДК 62-83:681.5

SYNTHESIS OF A ROBUST CONTROL SYSTEM FOR TWO-MASS ELECTRIC DRIVE BY H_∞ -THEORY

Rudniew Ye.S., Tymofieieva O.O., Brozhko R.M.

СИНТЕЗ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВОМАСОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТОДАМИ H_∞ -ТЕОРІЇ

Руднєв Є.С., Тимофєєва О.О., Брошко Р.М.

The practice of designing and operating control systems for industrial facilities has shown that systems synthesized according to the criteria of modular and symmetric optima, as well as by quadratic quality criteria, are sensitive to changes in the parameters of the controlled object, incoming characteristics, disturbing influences, the structure and parameters of the object model changing, which used in control loops. Such systems can lose optimality as well as productivity, if information about the object and operating environment is known with some probability or uncertainty. For an industrial electric drive, changes in load torque, moment of inertia of rotating parts, supply voltage and environmental characteristics (temperature, vibration) are especially significant. These changes affect both the mechanical characteristics rigidity and the transients' quality. Robust control systems provide a required quality of work when changing the characteristics of impacts and instability of the control object parameters in a wide range. In the presence of uncertainties, a robust controller provides robust stability and quality for all admissible uncertainties.

The synthesis of robust control systems with an H_∞ -speed controller of a two-mass electric drive by methods of H_∞ -theory is presented in order to prove the possibility of using algorithms for a given stabilization and speed control, as well as providing the necessary degree of sensitivity to parametric and coordinate disturbances acting on the control object. Application of the method of robust controllers' synthesis taking into account the requirements for the quality of a controlled coordinate transient processes in the control system. The analysis of the operation of a synthesized robust system with an H_∞ -speed controller using digital modeling on mathematical models in the MATLAB / Simulink environment is carried out. The possibility of the speed independent control, the steady-state error and the nature of the transient processes of the controlled coordinate in the synthesized electric drive control system is shown.

Key words: robust control, uncertainty, H_∞ -controller, electromechanical object.

Introduction. One of the main problems of modern control theory is the dynamic objects control under uncertainty conditions. Uncertainty is caused by the lack of complete information regarding parameters or characteristics of the plant, in addition, the mathematical model of the plant itself, obtained analytically or as a result of identification, differ from the real technical system. In recent decades, an approach has been developed when, in the presence of uncertainty, the problem arises of controlling not a single object, but a family of objects belonging to a given set. In comparison with algorithms of the classical control theory, it is necessary to provide the closed system stability not only for a nominal object, but also for any object from the given class of uncertainty with a single controller - is the task of the robust control synthesis (H_∞ -theory). Robust control system is not adaptive, but provides the necessary quality of work when the plant characteristics are change.

Interest in the synthesis of robust controllers is associated with the need to reduce the required amount of a priori information about the plant, the aspiration for the universality of control systems and reduce the cost of setting them up. Despite serious theoretical advances [1], including in the automated electric drive (ED) field, H_∞ -optimization methods have not used in daily domestic and foreign practice. This is due to the dominance in the market of complete electric drives with "classical" control algorithms.

The goal of the paper is to improve the stabilization accuracy and the quality of an AC drive speed control with a synchronous motor as a two-mass electromechanical system operating under conditions of incomplete information about the object and considering the parametric uncertainty by the methods of H_∞ -theory of robust control.

Research materials. A two-mass electromechanical object, which includes a synchronous electric motor with permanent magnets with a controlled transistor converter, is adopted as a control object.

In many cases, in the mathematical description, an idealization of a plant is used, based on the concept of a rigid connection between the engine and the actuator. The assumption is correct provided that the frequency of the natural elastic oscillations of the mechanism is significantly higher than the frequency that determines the speed of an electric drive control system. If this condition is not met, then neglect of elasticity and the presence of gaps in the analysis and synthesis of a system can lead to erroneous results. The system of equations describing the two-mass electromechanical object in the Cauchy form [2-4]:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \frac{1}{J_2} M_{12}; \\ pM_{12} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ p\omega_1 = \frac{1}{J_1} M_{12} + \frac{k_t}{J_1} I; \\ pI = -\frac{k_e}{R_s T_e} \omega_1 - \frac{1}{T_e} I + \frac{1}{R_s T_e} E_c; \\ pE_c = \frac{1}{T_\mu} E_c + \frac{k_c}{T_\mu} U_c \end{cases} \quad (1)$$

where ω_1, ω_2 – the angular speed of the motor and the actuator, respectively, 1/s; J_1, J_2 – the inertia moment of motor armature and the total inertia moment of various parts of a working body, reduced to the motor shaft, respectively, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; M_{12} – elastic twisting moment of the shaft, Nm; M – electromagnetic torque of the motor, Nm; I – motor armature current, A; c_{12} – shaft stiffness coefficient, Nms; $k_t = 3/2p_0\Psi_f$ – electromagnetic moment constant, a constant value that connecting an electromagnetic moment with an effective value of a stator current, Nm/A; $k_e = p_0\Psi_f$ – motor constant; Ψ_f – flux linkage of permanent magnets on the rotor; p_0 – number of machine pole pairs; R_s – active resistance of a stator winding, Ohm; T_e – electromagnetic time constant, s; E_c – electromotive force of converter, V; T_μ – time constant of converter, s; k_c – gain coefficient of converter; U_c – control voltage, V.

We assume that the active resistance of a stator winding is in a range of $\pm 40\%$ and the moment of inertia reduced to the motor shaft is in the range of $\pm 50\%$ of the nominal values.

Description of the above uncertainties, which are either not known exactly, or change during the operation of an electric drive, presented as a linear fractional transformation (LFT); the definition of the dynamics of the inputs / outputs of the system in a matrix representation, taking into account uncertainties as the transfer function matrix, as well as the sequence of transfor-

mation of the plant structural schemes with uncertain parameters, are considered by the authors in [5-7].

The creation of a generalized object $P(s)$ taking into account the weight functions $W_S(s)$, $W_R(s)$ and $W_T(s)$, which are used to ensure the desired quality of the system, as well as the detailed synthesis of the H_∞ -controller using the "Two-Riccati Approach" are published in [8-10].

The task of H_∞ -optimization is the controller selection K that would minimize the infinite norm T_{ZW} . Selection of the optimal regulator K is carried out over the set of all regulators that have the property of making the closed system T_{ZW} internally stable, i.e. over a set of stabilizing controllers. The H_∞ -norm serves as a measure of the system strengthening. The H_∞ -norm of transfer function is the output energy of the system when a signal with unit energy is supplied to the input. If the output is an error and the input is a disturbance, then by minimizing the H_∞ -norm of the transfer function we minimize the error energy for the worst case of the input disturbance.

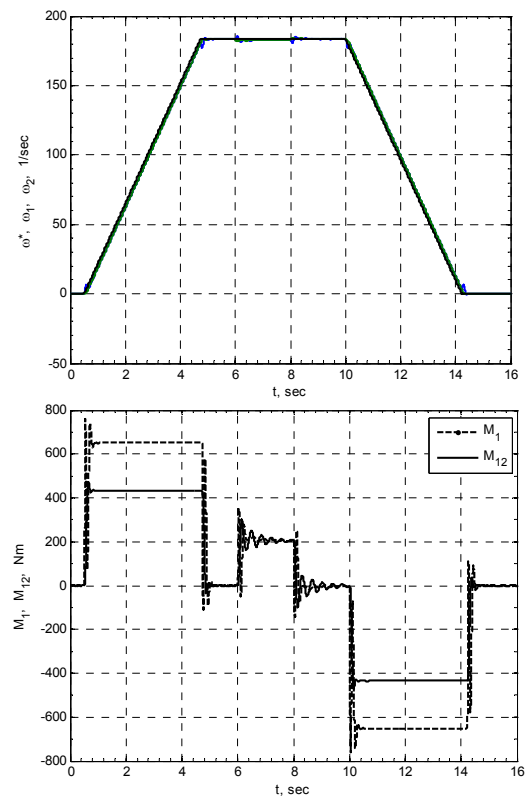


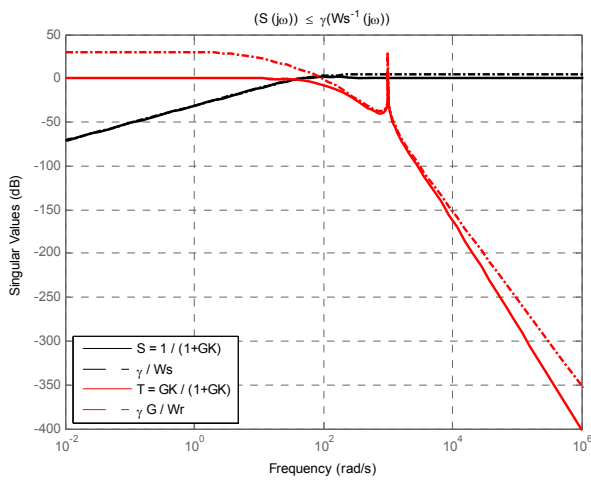
Fig. 1. Graphs of transient processes in a robust control system at nominal parameters $M_c=0,5\cdot M_{nem}$

The robust H_∞ -suboptimal speed controller of synchronous electric motor with permanent magnets was synthesized using effective methods implemented in the Robust Control Toolbox extension package of the MATLAB system, which, using the presented algorithms [3-4], calculate the central H_∞ -suboptimal controller that minimizes H_∞ -closed-loop norm $\|T_{ZW}\|_\infty$. The synthesized robust speed controller is a 7th order controller according to the H_∞ -norm criterion. The

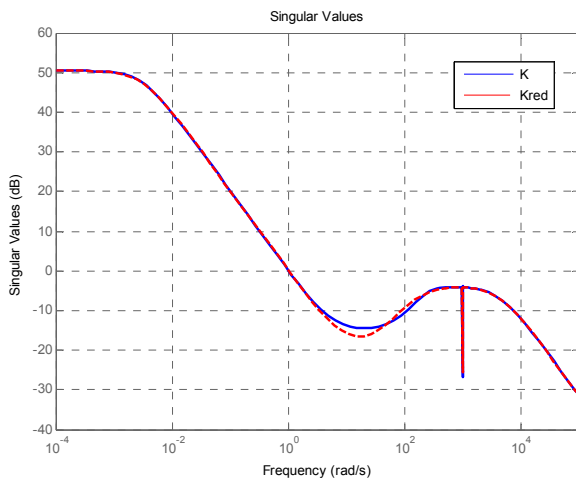
achieved H_∞ -norm of the closed-loop system, obtained during the iterative process, was 0,814. With the help of algorithms for lowering the order of the system, the speed controller was reduced to the 5th order.

Fig. 1 shows the results of a two-mass electromechanical object operation with the synthesized H_∞ -speed controllers when processing closed robust control system of a given trajectory and an applied moment of resistance $0,5 \cdot M_{nem}$.

In fig. 2 are shown the singular values of the sensitivity function S and additional sensitivity T which amplitude-limited by weight functions. These characteristics indicate the achieved quality of a robust control system with a synthesized H_∞ -controller.



a



b

Fig. 2. Singular values S and T which amplitude-limited by weight functions (a) and frequency characteristics of the full order (7th) and reduced (5th order) regulator (b)

In fig. 3, 4 are shown the simulation results with a variation of the plant parameters (simultaneous decrease and increase J_2 and R_s by 2 times from the nominal values).

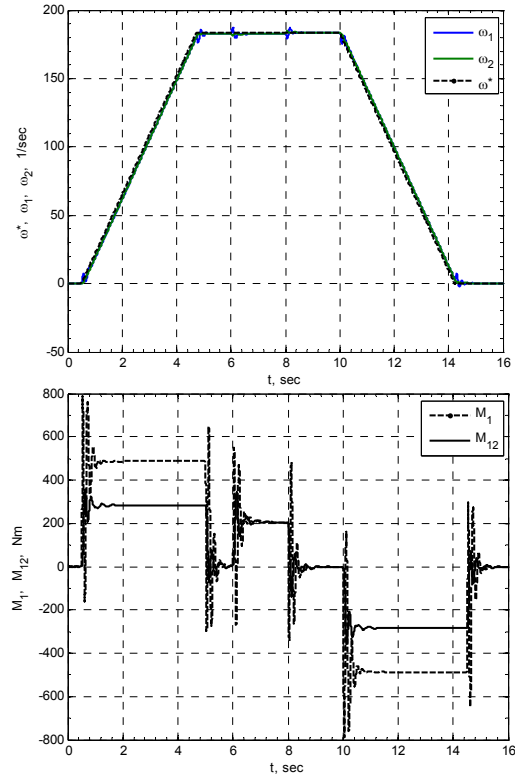


Fig. 3. Graphs of transient processes in robust control system with a simultaneous decreasing J_2 and R_s by 2 times

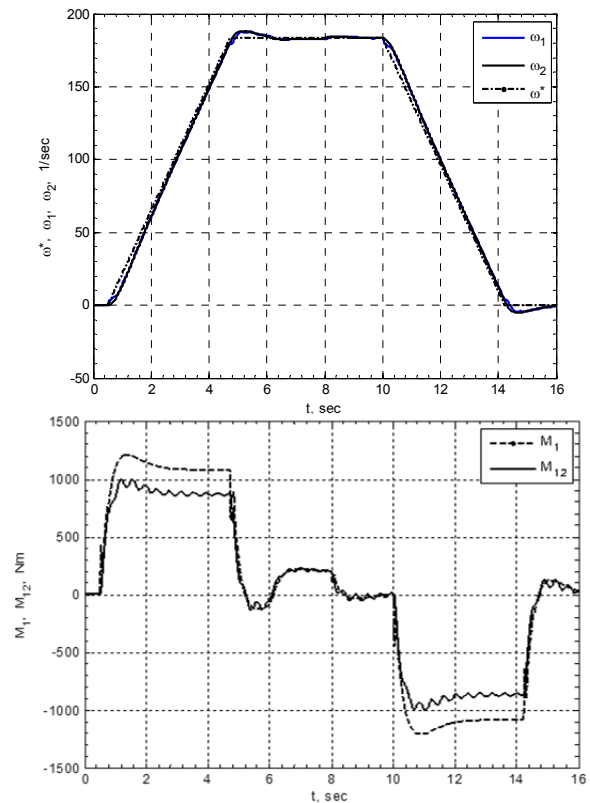


Fig. 4. Graphs of transient processes in robust control system with simultaneous increasing J_2 and R_s by 2 times

The equation in a state space of the reduced rate H_∞ -controller of a two-mass ED:

$$K_\infty = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -4258 & 339 & -472,7 & 0 & 0 \\ 59,5 & -4,9 & 6,6 & 0 & 0 \\ -44,8 & 6,2 & -4,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,4 \cdot 10^4 & 4783 \\ 0 & 0 & 0 & -1,2 \cdot 10^5 & 2,4 \cdot 10^4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 46,4 \\ 2,5 \\ 87,8 \\ 0,072 \\ 0,014 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [47,62 \quad -2,72 \quad 5,2 \quad 10,2 \quad 2,08], \quad \mathbf{D} = [0].$$

Conclusions. For effective suppression of oscillation arising into two-mass visco-elastic electromechanical system "electric motor - actuator", the possibility of using the H_∞ -theory in the construction of control systems with such objects is shown. A robust H_∞ -suboptimal speed controller was synthesized for a two-mass electromechanical object under conditions of incomplete information about the object and taking into account its uncertainties. The resulting controller provides the control system with robust quality characteristics and a given accuracy of maintaining the speed.

References

1. Doyle J.C, Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1989. – Vol. 34. No 8. – pp.831-847.
2. Borcov Ju.A., Sokolovskij G.G. Avtomatizirovannyj Elektroprivod s uprugimi svjazjami / 2-e izd., pererab. i dop. – SPb.: Energoatomizdat. Sankt-Peterburg, 1992. – 288 s
3. Polilov E.V., Rudnev E.S., Skorik S.P., Shhelokov A.G., Gorelov P.V. Sintez algoritmov robastnogo upravlenija dvuh-massovym elektromehaničeskim ob'ektom metodami H_∞ -teorii / Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Harkiv: NTU «HPI». – 2010. – №. 28. – S.125-132.
4. Polilov E.V., Rudnev E.S., Skorik S.P. Robastnoe upravlenie dvuhmassovym jelektromehaničeskim ob'ektom / Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – Alčevsk: DonGTU. – 2013. – № 41. – S. 229-233.
5. Polilov E.V., Zelenov A.B., Rudnev E.S. Praktičeskij podhod k vyboru ve-sovyh funkcij dlja H_∞ -teorii robastnogo upravlenija / Visnik Kremenčuk'kogo derzhavnogo politehničnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo. – Kremenčuk: KDPU, 2009. – № 3/2009 (56) chastina 2. – S.17-24.
6. Polilov E.V., Zelenov A.B., Rudnev E.S Sintez robastnoj sistemy upravlenija javnopoljusnoj sinhronnoj mashiny /

Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Harkiv: NTU «HPI», 2008, № 30. – S.136-140.

7. Polilov E.V., Rudnev E.S., Skorik S.P. Vybor vesovyh funkcij v H_∞ -teorii robastnogo upravlenija elektroprivodami / Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – Alčevsk: DonGTU. – 2012. – № – S. 307-316.
8. Rudnev E.S. Praktičeskaja realizacija i issledovanie robastnyh algoritmov upravlenija sinhronnym elektroprivodom / Elektromehanični i energozberigajuchi sistemi. – Kremenčuk: KrNU. – 2012. – № (19). – S.102-107.
9. Polilov E.V., Rudnev E.S., Skorik S.P. Robastnoe upravlenie sinhronnym jelektroprivodom: Monografija / Alčevsk: DonGTU, 2012. – 253 s.
10. Rudnev E. et al. H_∞ -Robust Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors: Performance Analysis // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – C. 1-5.

Руднев Є.С., Тимофєєва О.О., Брожко Р.М. Синтез робастної системи управління двомасовим електроприводом методами H_∞ -теорії

Практика проектування і експлуатації систем керування промисловими об'єктами показала, що системи, синтезовані за критеріями модульного і симетричного оптимумів, а також за квадратичними критеріями якості, чутливі до змін параметрів об'єкта керування, характеристики вхідних, збурюючих впливів, до змін структури та параметрів моделі об'єкта, яка використовується в контурах управління. Такі системи можуть втрачати і оптимальність, і працездатність, якщо інформація про об'єкт і середовище функціонування відома з деякою вірогідністю або невизначеністю. Для промислового електроприводу особливо значущі зміни моменту навантаження, моменту інерції обертових частин, напруги живлення і характеристик навколишнього середовища (температура, вібрація). Ці зміни впливають як на жорсткість механічних характеристик, так і на якість перехідних процесів.

Робастні системи керування забезпечують необхідну якість роботи при зміні характеристик впливів і нестійкості параметрів об'єкта керування в широкому діапазоні. Робастний регулятор при наявності невизначеностей забезпечує робастні стійкість і якість для всіх допустимих невизначеностей.

Наведено синтез систем керування з H_∞ -регулятором швидкості двомасового електроприводу методами H_∞ -теорії з метою доказу можливості застосування алгоритмів для заданої стабілізації та регулювання швидкості, а також забезпечення необхідного ступеня чутливості до параметричних і координатних збурень діючих на об'єкт керування. Застосування методу синтезу робастних регуляторів, який враховує вимоги до якості перехідних процесів регульованої координати в системі керування. Проведено аналіз роботи синтезованої робастної системи з H_∞ -регулятором швидкості за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях в середовищі MATLAB / Simulink. Показана можливість незалежного управління швидкодією, усталеною похибкою і характером протікання перехідних процесів регульованої координати в синтезованій системі керування електроприводом

Ключові слова: Робастне управління, невизначеність, H_∞ -регулятор, електромеханічний об'єкт.

Руднев Е.С., Тимофеева О.А., Брошко Р.Н. Синтез робастной системы управления двухмассовым электроприводом методами H_∞ -теории

Практика проектирования и эксплуатации систем управления промышленными объектами показала, что системы, синтезированные по критериям модульного и симметричного оптимумов, а также по квадратичным критериям качества, чувствительные к изменениям параметров объекта управления, характеристики входящих, возмущающих воздействий, к изменениям структуры и параметров модели объекта, которая используется в контурах управления. Такие системы могут терять и оптимальность, и работоспособность, если информация об объекте и среде функционирования известна с некоторой вероятностью или неопределенностью. Для промышленного электропривода особенно значимы изменения момента нагрузки, момента инерции вращающихся частей, напряжения питания и характеристик окружающей среды (температура, вибрация). Эти изменения влияют как на жесткость механических характеристик, так и на качество переходных процессов.

Робастные системы управления обеспечивают необходимое качество работы при изменении характеристик воздействий и нестабильности параметров объекта управления в широком диапазоне. Робастный регулятор при наличии неопределенностей обеспечивает робастные устойчивость и качество для всех допустимых неопределенностей.

Приведен синтез робастных систем управления с H_∞ -регулятором скорости двухмассового электропривода методами H_∞ -теории с целью доказательства возможности применения алгоритмов для заданной стабилиза-

ции и регулирования скорости, а также обеспечение необходимой степени чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям действующих на объект управления. Применение метода синтеза робастных регуляторов, учитывающий требования к качеству переходных процессов регулируемой координаты в системе управления. Проведен анализ работы синтезированной робастной системы с H_∞ -регулятором скорости с помощью цифрового моделирования на математических моделях в среде MATLAB/Simulink. Показана возможность независимого управления быстродействием, установившейся ошибкой и характером протекания переходных процессов регулируемой координаты в синтезированной системе управления электроприводом.

Ключевые слова: робастные управления, неопределенность, H_∞ -регулятор, электромеханический объект.

Руднев Е.С. – к.т.н., в.о. зав. кафедры електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, rudnev_es@snu.edu.ua

Тимофеева О.О. – асистент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, o.a.tymofieieva@gmail.com

Брошко Р.М. – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, brozhko@snu.edu.ua

Стаття подана 30.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-49-52>

УДК 658.5 621.37

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Тюндер И.С.

OPTIMIZATION OF THE PROCESSING SEQUENCE OF BLOCKS OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Tyunder I.S.

При проектировании гибкой производственной системы (ГПС) необходимо решать задачу рациональной загрузки оборудования гибкого производственного модуля (ГПМ). Эффективное использование технологического оборудования в ГПС в значительной степени зависит от ее структуры, определяемой на стадии проектирования. В статье приведена компьютерная методика формирования оптимальной по составу производственной партии блоков электронной аппаратуры (ЭА) и последовательности ее запуска в производство на основании критерия минимизации суммарного времени ее изготовления.

Ключевые слова: гибкая производственная система, гибкий производственный модуль, оптимизация последовательности обработки блоков, программа GPM Tool, блок электронной аппаратуры.

Введение. Эффективное использование технологического оборудования в ГПС в значительной степени зависит от ее структуры, определяемой на стадии проектирования. Исходной информацией для проектирования являются сведения о номенклатуре подлежащих сборке изделий (о составе и размере отдельных партий, программах выпуска, видах и размерах соединений), типах сборочных модулей, ограничениях на выбираемое оборудование, инструмент, сборочную оснастку, производственные площади и т.д. Значительная номенклатура собираемых изделий, многообразие маршрутов сборки, стохастический характер поступления различных партий изделий на сборку и объемов этих партий требует решения сложной многовариантной задачи при определении компоновочной схемы линии сборки. [1]

Постановка проблемы. Одним из направлений, способствующих повышению эффективности сборки и качества выпускаемой продукции, является внедрение многономенклатурных, быстро перенастраиваемых автоматизированных модулей. При создании гибкой перенастраиваемой линии ре-

шались задачи обеспечения максимального использования ее ресурсов, расход которых обусловлен выбором наиболее экономичной гибкости и организационно-планового обеспечения. [1] Для этого необходимы методы проектирования (синтеза, технико-экономической оценки (ТЭО), оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости) и методики проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ из однотипных и разнотипных компонентов с учетом вероятностного характера сборки; оптимальных транспортных операций, компоновки оборудования, оптимальных структур. [3]

Основным источником информации для оптимизации последовательности обработки блоков являются сведения о количестве блоков в партии и о составе навесных элементов в каждом блоке. Также в процессе проведения расчетов необходима дополнительная информация о коэффициенте серийности производства, фонде рабочего времени и допустимых интервалах коэффициента загрузки оборудования. Основываясь на справочных материалах, необходимо выбрать типы и параметры технологического оборудования. В статье «Расчет параметров гибкой производственной системы», которая была опубликована в Вестнике №17 (188), описаны методика и программа расчета количества и производительности оборудования гибкой производственной системы сборки блоков электронной аппаратуры. Значения, полученные в результате расчетов, являются исходными данными для оптимизации последовательности обработки партии. Программа GPM Tool предназначена для формирования оптимальной по составу производственной партии блоков ЭА и последовательности ее запуска в производство на основании критерия минимизации суммарного времени ее изготовления.

Программой предусмотрено несколько различных методов, в том числе:

- выбор последовательности вручную;
- полный перебор;
- расчет при помощи алгоритма.

Общим для всех методов является процедура определения времени обработки партии. Ее работу можно описать следующим образом: формируются матрицы, содержащие времена начала и завершения обработки блоков на первом ГПМ (гибкий производственный модуль), поскольку задержек связанных с ожиданием нет, то первый ГПМ будет загружен максимальным образом. Если момент поступления следующего блока на обработку наступает в тот момент, когда предыдущий блок уже обработан, то задержки не возникает, в противном случае время начала обработки начинается после завершения предыдущего и время его обработки определяется как сумма времени завершения обработки предыдущего и время обработки текущего блоков, таким образом формируется цепочка времен обработки блоков на всех модулях. Временем обработки всей партии будет являться время завершения обработки последнего блока на последнем из гибких производственных модулей.

Анализ последних публикаций. Вопросы разработки и исследования оптимальных технологических операций сборки электронных модулей из однотипных и разнотипных компонентов для гибких автоматизированных сборочных комплексов в многономенклатурном производстве, повышение эффективности загрузки оборудования гибкой сборочной линии с помощью статистического моделирования, задачи выбора компоновки роботизированного технологического комплекса стали предметом исследования в работах В.Г.Журавского, Ю.В. Иванова, Н.А. Лакоты, И.В. Бухтеева, О.Б. Бавыкина, П.Е. Елхова.

Цель статьи. Формирование оптимальной по составу производственной партии блоков ЭА и последовательности ее запуска в производство на основании критерия минимизации суммарного времени ее изготовления.

Экспериментальная часть. При запуске программы GPM Tool пользователем становится доступным окно "выбора метода" оптимизации партии блоков ЭА (рисунок 1).

Выбор метода осуществляется путем деления соответствующей позиции на панели "метод оптимизации" и нажатии кнопки "Выбрать", при этом при переключении между вариантами в окне 1 выдается краткая справка о назначении и особенностях метода.

Панель "Опции" содержит кнопки, при помощи которых можно осуществить возврат на предыдущий этап расчетов, выход из программы и вывод полученных результатов в текстовый файл (файл размещается в папке Report).

При выборе варианта "Ввод вручную" открывается окно, вид которого представлен на рисунке 2.

Панель "Параметры партии" содержит таблицу (позиция 1), отображающую параметры блока и его положение в производственной программе, выбор

текущего блока, работа с которым ведется в данный момент, осуществляется при помощи навигационных кнопок (позиция 2). Панель "Свободные позиции" отображает номера блоков, которым на данный момент еще не присвоен порядковый и общее количество таких блоков. Присвоение блоку номера может осуществляться двумя путями: двойным нажатием левой кнопкой мышки на строке с выбранным блоком, либо путем ввода позиции в окошке "Данные" (Позиция 5). При завершении ввода последовательности блоков необходимо нажать кнопку "Рассчитать" на панели "Опции" (Позиция 4).

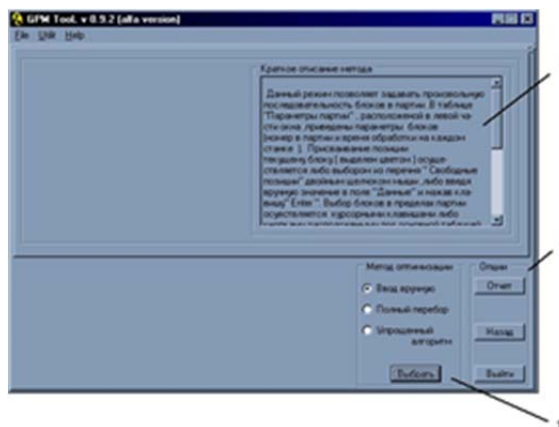


Рис. 1. Начальное окно программы

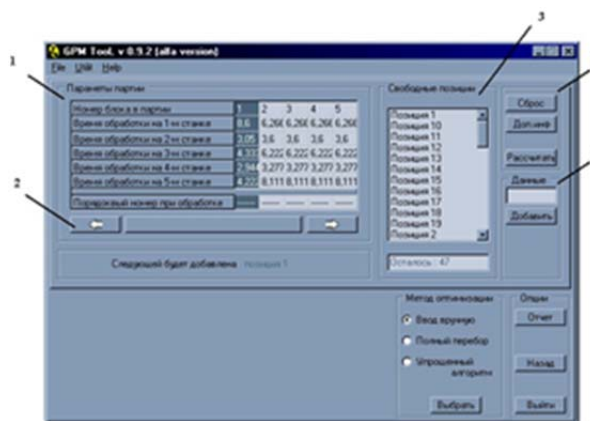


Рис. 2. Ввод вручную

При выборе варианта "Полный перебор" открывается окно, вид которого представлен на рисунке 3.

Панель "Тип моделирования" (Позиция 1) позволяет выбрать пользователю наиболее благоприятный для него вариант проведения расчетов. Панель "Показатель хода выполнения процесса" (Позиция 2) выводит информацию о текущем статусе программы. В таблице (Позиция 3) отражается та последовательность блоков, расчет времени для которой выполняется в данный момент. Данные расчетов (номер варианта и значение времени) отражаются в позиции 6. При завершении расчетов полученные данные выводятся в таблицу "Результаты расчета" (Позиция 4).

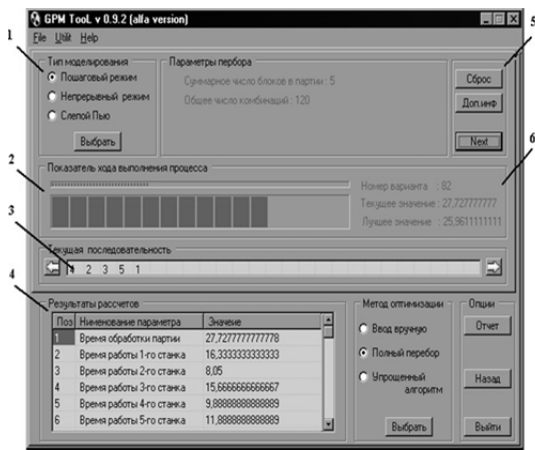


Рис. 3. Полный перебор

Для уменьшения времени, затрачиваемого на проведение расчета, в программе предусмотрен специальный "Слепой" режим, вызов которого осуществляется в соответствующем разделе панели "Тип моделирования" (Позиция 1), вид окна вызываемого при этом имеет вид, представленный на рисунке 4.

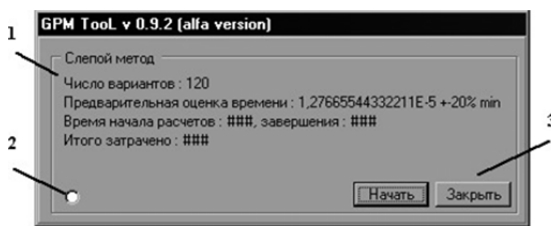


Рис. 4. Слепой метод

При данном режиме за счет исключения затрат ресурсов на вывод информации о текущем состоянии расчетов и оптимизации алгоритмов достигнуто значительное сокращение времени проведения расчетов. Окно состоит из следующих областей:

- краткая информация о партии (Позиция 1);
- индикатор (Позиция 2);
- кнопки управления (Позиция 3).

После определения последовательности обработки блоков существует возможность оценить работу накопителей навесных элементов с целью выявления наиболее критических времен остановки производственной линии, связанных с необходимостью пополнения запасов навесных элементов тех или иных типов. Для этого необходимо нажать кнопку "Расчет накопителей", которая расположена в правой нижней части окна основной формы программы. При этом на экран будет выведено окно, внешний вид которого представлен на рисунке 5.

Для проведения расчетов необходимо указать в позиции 1 номер технологического оборудования и в позиции 2 – суммарную емкость накопителей для каждого из типов навесных элементов устанавли-

ваемого на данном оборудовании, при нажатии кнопки "Расчитать" в таблицу (позиция 3) будут выведены следующие данные:

- порядковый номер технологической тары;
- расчетная емкость;
- порядковый номер блока в партии, на котором произойдет останов оборудования;
- время непрерывной работы оборудования до останова.

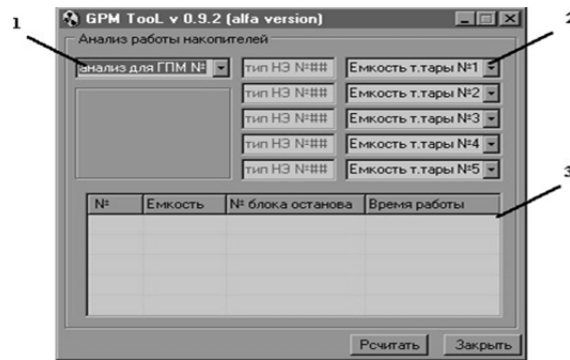


Рис. 5. Анализ работы накопителей

Вывод. Таким образом, определяем последовательность обработки блоков на основании критерия минимизации суммарного времени ее изготовления.

Программа также позволяет провести анализ работы накопителей на каждом из модулей, производящего сборку блоков, определить время, когда необходимо пополнять запасы элементов, а также выявить, те типоразмеры, для которых целесообразно увеличить число и емкость накопителей с целью сокращения времени на простои оборудования связанные с нуждами обслуживания, и избежать в случае чрезмерного запаса элементов, нерационального использования ресурсов. Кроме этого, можно создать текстовый файл отчета, содержащий матрицы, а также результаты оптимизации и параметры загрузки оборудования, соответствующие рассчитанной последовательности обработки.

Л и т е р а т у р а

1. Елхов П.Е. Повышение эффективности загрузки оборудования гибкой автоматизированной линии с помощью статистического моделирования / П.Е. Елхов, И.В. Бухтева. - М.: Транспортное дело России.- 2013. - №5.- С.16-23.
2. Иванов Ю.В. Разработка и исследование оптимальных технологических операций сборки электронных модулей из однотипных компонентов для гибких автоматизированных сборочных комплексов в многономенклатурном производстве / Ю.В. Иванов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение".- 2014.- № 4.- С.97-112
3. Аббясов В.М Предварительный выбор и оптимизация надежности автоматического сборочного оборудования / В.М. Аббясов, И.В. Бухтева, П.Е. Елхов // «Сборка в машиностроении, приборостроении».- 2015. -№1. - С.14-16.

4. Иванов Ю.В. Проектирование автоматизированных технологических процессов сборки ЭМ в ГАСК: Учеб. пособие / Ю.В. Иванов.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 45 с.
5. Иванов Ю.В. Автоматизация проектирования структур гибких автоматизированных сборочных комплексов многономенклатурного производства электронной аппаратуры: Учеб. Пособие / Ю.В. Иванов.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 45 с.

References

1. Elkhov P.E. Improving the efficiency of equipment utilization flexible assembly line using statistical modeling / P.E. Elkhov, I. V. Bukhteeva.- М.: Transport business in Russia. -2013. -№5, P.16-23.
2. Ivanov Yu.V. Development and research of optimal technological operations for assembling electronic modules from the same-type components at flexible automated assembling robotic complexes in multi-nomenclature production / Yu.V. Ivanov.// Vestnik MGTU. im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering].- 2014.-№. 4. - P. 97-112
3. Abjasov V.M. Preselection and optimization of the reliability of automatic assembly equipment / V.M. Abjasov, I.V.Bukhteeva, P.E. Elkhov // Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii.- 2015.- №1.- P.14-16.
4. Ivanov Yu.V. Proektirovanie avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh protsessov sborki EM v GASK : [Computer-aided engineering of production methods of circuit modules using flexible automated assembly site] / Yu.V. Ivanov.- Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004.- 45 p.
5. Ivanov Yu.V. Avtomatizatsiya proektirovaniya struktur gibkikh avtomatizirovannykh sborochnykh kompleksov mnogonomenklaturnogo proizvodstva elektronnoy apparatury: [Computer-aided engineering of structures of flexible automated assembly site of multiproduct manufacture of electronic apparatus] / Yu.V. Ivanov.- Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004.- 45 p.

Тюндер І.С. Оптимізація послідовності обробки блоків електронної апаратури.

При проектуванні гнучкої виробничої системи (ГВС) необхідно вирішувати задачу раціонального завантаження устаткування гнучкого виробничого модуля (ГПМ). Ефективне використання технологічного обладнання в ГВС в значній мірі залежить від її структури, яка визначається на стадії проектування. У статті наведено комп'ютерна методика формування оптимальної за складом виробничої партії блоків електронної апаратури (ЕА) і послідовності її запуску у виробництво на підставі критерію мінімізації сумарного часу її виготовлення.

Ключові слова: гнучка виробнича система, гнучкий виробничий модуль, оптимізація послідовності обробки блоків, програма GPM Tool, блок електронної апаратури.

Tyunder I.S. Optimization of the processing sequence of blocks of electronic equipment

When designing a flexible manufacturing system (FMS), it is necessary to solve the problem of rational loading of equipment in a flexible manufacturing module (FMM). The effective use of technological equipment in the FMS to a large extent depends on its structure, which is determined at the design stage. The article presents a computer technique for forming the optimal composition of a production batch of electronic equipment (EE) units and the sequence of its launch into production on the basis of the criterion for minimizing the total production time. The main source of information for optimization of sequence of treatment of blocks is information about the amount of blocks in party and about composition of navechnykh elements in every block. The GPM Tool program is designed to form the optimal composition of the production batch of blocks and the sequence of its launch into production based on the criterion of minimizing the total production time.

The program provides several different methods, including:

- manual sequence selection;
- full search;
- calculation using an algorithm.

Common to all methods is the procedure for determining the processing time of party. Her work can be described as follows: matrices are formed, containing times of beginning and completion of treatment of blocks on first FMM (flexible manufacturing module), as delays related to expectation it is not, the first FMM will be loaded as much as possible. If the moment of arrival of the next block for processing occurs at the moment when the previous block has already been processed, then there is no delay, otherwise the start time of processing starts after the completion of the previous one and its processing time is determined as the sum of the processing completion time of the previous block and the processing time of the current block thus, thus forming a chain of block processing times on all modules. Time of treatment of all party will be time of completion of treatment of the last block on the last from the flexible productive modules.

The program also allows you to analyze the operation of work of stores on each of the modules that assemble blocks, determine the time when it is necessary to replenish stocks of elements, also allows you to identify those standard sizes for which it is advisable to increase the number and capacity of stores in order to reduce the time for equipment downtime associated with maintenance needs, and to avoid, in the event of an excessive stock of elements, wasteful use of resources.

The aim of the article is to form the optimal production batch of blocks and the sequence of her launch into production based on the criterion of minimizing the total time of her production, which was done.

Keywords: flexible productive system, flexible productive module, optimization of sequence of treatment of blocks, program GPM Tool, block of electronic apparatus.

Тюндер І.С. – старший викладач Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-53-57>

УДК 621.365

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ БАЗОВОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОДА ДЛЯ РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В.

ANALYSIS OF CAPABILITY FOR IMPROVEMENT OF BASIC MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRODE OF FERRO-ALLOY FURNACE

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.

The article analyzes the Mathematical Model of The Self-Baking Electrode which is defined as basic. Its advantages and disadvantages are determined. Criterias for creating more advanced mathematical model for equalizing the thermal field of the Electrode are proposed.

The problem of calculating the thermal field is solved by the the method of elementary heat balances of electrode. For this goal the simulated area is divided into annular (cylindrical) elements along the radius and height of the electrode. The calculation of the temperature field of the electrode is carried out in two stages: I – with boundary conditions and currents for the parts of the electrode facing to the center of the smelting furnace; II – with boundary conditions and currents for the parts of the electrode facing to the lining.

The mathematical model takes into account an effect of the ribs and the hood on the distribution of electric current and Joule's Heat over the cross section of the Electrode. In case heating ferromagnetic materials under impact of an electromagnetic field, the magnetic permeability at first decreases relatively slowly, and then dropping down sharply as a certain temperature (Curie Point) is reached. The material loses its magnetic properties completely and goes into into a paramagnetic state.

The value of the electrode current changes according to the graph from the starting value to the working value and then remains constant. The current density of the electrode along the radius is unequal due to the action of the surface effect, as well as due to existence of a metal hood and ribs, the electrical conductivity of which is higher than conductivity of special carbon paste.

The goal of the work is to create modern mathematical model of the secondary current network of electric smelting furnace which could improve baking conditions of the Electrode and to reach the state of its temperature field to equable. This would create a stable mode of operation of the furnace. The paper analyzes the main features of the mathematical model of the secondary network of the smelting furnace, identifies the stages of development and formulates the main assumptions simplifications that could be accepted while creating this model.

Keywords: *Mathematical Model, Self-Baking Electrode, Electrode's Electric Current, Thermal Field.*

Introduction. The article analyzes The mathematical model of the self-baking electrode which is defined as basic. Its advantages and disadvantages are determined. Criterias for creating more advanced mathematical model for equalizing the thermal field of the Electrode are proposed.

Problem statement. The problem of calculating the thermal field is solved by the the method of elementary heat balances of electrode. For this goal the simulated area is divided into annular (cylindrical) elements along the radius and height of the electrode.

Analysis of recent years research and publications. There are well known mathematical models of a self-baking electrodes [1, 2, 3, 4, 5]. The most successful is the mathematical model [2] which is accepted as the basic for research.

The self-baking electrode is made of metal (steel) hood and filled by a special mass so called unbaked carbon paste. The hood with internal ribs serves as a forming shell for the electrode mass and provides an alternating electric current flow to its lateral surface by special contact's cheeks.

The contact of electrode-contact's cheek is not ideal. the contact pressure is considered to be known and for all cheeks are the same.

The value of the electrode current changes according to the graph from the starting value to the working value and then remains constant. The current density along the radius is unequal due to the action of the surface effect, as well as due to existence of a metal hood and ribs, the electrical conductivity of which is higher than conductivity of special carbon paste [6].

The electrode baking takes place due to Joule's Heat and heat from the smelting bath. The electrode carbon paste goes through all stages of phase transformations gradually [7].

The purpose of the article. The goal of the work is to create modern mathematical model of the secondary current network of electric smelting furnace which could improve baking conditions of the Electrode and to reach the state of its temperature field to equable. This would create a stable mode of operation of the furnace.

Results of the research. The operating conditions of the electrode allow to distinguish four characteristic zones according to its height, so electrode column is divided into parts Fig.: the zone of the charge (bottom end of the electrode); free zone from the level of the charge to the lower edge of the contact cheeks; cheek area; the mantel zone is above the upper level of the contact's cheeks.

The value of the electrode current changes according to the graph from the starting value to the working value and then remains constant. The current density along the radius is unequal due to the action of the surface effect, as well as due to existence of a metal hood and ribs, the electrical conductivity of which is higher than conductivity of special carbon paste.

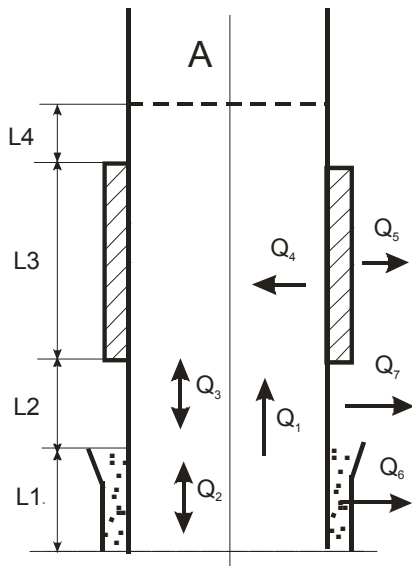


Fig. A typical electrode column:
L1 – the zone of the charge; L2 – free zone;
L3 – cheek area; L4 – the mantel zone;
A – the mantel zone; A – the loading zone;
 Q_i – heat fluxes of electrode

The current density in the cheeks is unequal along the height of the cheeks and in the zone of the charge due to the spreading of current into the charge from the side surface of the electrodes.

During working operation the end of the electrode burns out and takes a parabolic shape which makes it necessary to shift down the electrode for a certain length. Moving down is made periodically.

The electrode baking takes place due to Joule's Heat and heat from the smelting bath. The electrode

carbon paste goes through all stages of phase transformations gradually.

During operation the metal hood and ribs are burned out while a certain temperature is reached. there are no hood and ribs in the carbonization zone block.

The method of elementary heat balances as a solution of the calculation problem of temperature fields of the electrode is used [8]. For that the simulated section of the electrode is divided into annular (cylindrical) elements along the radius (index i) and height (index k) of the electrode. For an arbitrary i, k -th element, the heat balance equation can be written as:

$$\Delta Q_{i+1,k} + \Delta Q_{i,k+1} + \Delta Q_{i-1,k} + \Delta Q_{i,k-1} + \Delta Q_V = \Delta Q_{\tau+\Delta\tau}, \quad (1)$$

here $\Delta Q_{i\pm 1,k\pm 1}$ – is the amount of heat that entered the element i, k , respectively along the directions $i \pm 1, k \pm 1$;

- ΔQ_V – the amount of heat released in the element due to the passage of electric current;

- $\Delta Q_{\tau+\Delta\tau}$ – the amount of heat consumed to increase the two-sided energy of the i, k -th element over a period of time $\Delta\tau$.

After transformation of the formula (1) the calculated dependence of the determination of the temperature of the i, k -th element through the definite time interval is obtained:

$$t_{i,k}^{\tau+\Delta\tau} = t_{i,k}^{\tau} + \frac{\Delta\tau}{C_{i,k}} \cdot (\Sigma q - t_{i,k}^{\tau} \cdot \Sigma \rho + \Delta \cdot Q_V), \quad (2)$$

here $t_{i,k}^{\tau+\Delta\tau}$ is the temperature of the i, k -th element after a time interval $\Delta\tau$;

- $t_{i,k}^{\tau}$ – temperature of the i, k -th element at current time;

- $C_{i,k}$ – total heat capacity of the i, k -th element;

- $\Delta\tau$ – time interval.

$$\Sigma q = t_{i+1,k}^{\tau} \cdot \rho_{i+1,k} + t_{i,k-1}^{\tau} \cdot \rho_{i,k-1} + t_{i-1,k}^{\tau} \cdot \rho_{i-1,k} + t_{i,k+1}^{\tau} \cdot \rho_{i,k+1};$$

$$\Sigma \rho = \rho_{i+1,k} + \rho_{i,k+1} + \rho_{i-1,k} + \rho_{i,k-1},$$

here $\rho_{i\pm 1,k\pm 1}$ is thermal conductivities along directions i and k .

Calculation the temperature field of the electrode according to equation (2) is necessary to appoint the boundary conditions for heat transfer and determine the Joule's Heat Q_V .

The temperature of the blown air is specified in a space of the mantel. the temperature of the cooling water is specified in the cheek area. the temperature of

the gas is specified in the free zone and it is a function of height and time. the temperature of the charge layer adjacent to the electrode and the temperature of the surface of the working end of the Electrode are specified in the charge zone.

For calculation the Joule's Heat that released in the electrode during passing of electric current, the current density is determined at every calculated point. Assuming that the current lines are directed parallel to the electrode axis, then the distribution of the current density over the cross section of the electrode can be determined from the equation for a cylindrical wire of circular cross section.

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}_{m0} \cdot I_0(x), \quad (3)$$

here $\dot{\delta}_{m0}$ is the complex amplitude of the current density along the axis of the wire;

$$- I_0(x) = 1 - \frac{x^2}{r^2} + \frac{x^4}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} - \text{Bessel's}$$

function of the first kind of zero order ;

$$- x = 2 \cdot \sqrt{-j \cdot \omega \cdot \mu \cdot \gamma} - \text{complex value};$$

- r – current radius ;

- ω – angular frequency ;

- μ – magnetic permeability ;

- γ – specific thermal conductivity.

The amount of heat released per unit time in the i , k -th element can be determined from the expression:

$$\Delta Q_{vi,k} = \delta_{i,k}^2 \cdot \sigma_{i,k} \cdot \Delta V_{i,k}, \quad (4)$$

here $\sigma_{i,k}$ is the specific electrical resistance;

- $\Delta V_{i,k}$ – volume of i , k -th element.

The thermal and electrophysical dependences of the electrode mass vs temperature, phase transformations and latent heats of chemical reactions are taken into account while calculating the temperature field. The mathematical model takes into account an effect of the ribs and the hood on the distribution of electric current and Joule's Heat over the cross section of the Electrode. In case heating ferromagnetic materials under impact of an electromagnetic field, the magnetic permeability at first decreases relatively slowly, and then dropping down sharply as a certain temperature (Curie Point) is reached. The material loses its magnetic properties completely and goes into into a paramagnetic state. Therefore there are three gaps of temperatures those characterized by significant differences in the distribution of the current over the cross section of the Electrode: from the initial temperature to the Curie Point; from the Curie Point to the burnout temperature of the hood and ribs; from the burnout temperature and up temperature; the ribs and hood are not taken into

account in the calculation process at the burnout temperatures and higher.

The burning out of the working end of the electrode does layer by layer, the process begins with surface layers. Burning simulation is carried out by successive exclusion of settlement points from the calculation scheme. The displacement is simulated by shifting the entire temperature field of the Electrode by the displacement setpoint periodically. The process of operation of the electrode is considered to be steady while the temperature field of the electrode at the moment of the n -th displacement coincides with the temperature field ($n - 1$) of the displacement.

The initial data are entered into the program for every variant of option the temperature field of the electrode, including geometric, technological and operational factors, and thermal and electrophysical properties of the electrode too. The basic mathematical model of the self-baking electrode solves a problem of two-dimensional heat transfer. Its main disadvantages are:

a) do not taken into account differences in the boundary conditions of the electrode operation in the parts facing the center of the furnace and towards the lining;

b) do not taken into account the proximity factor while calculating the current distribution over the cross section of the Electrode and uneven distribution.

A mathematical model of the electrode has been developed which is devoid of these disadvantages. At that model the current flowing through the electrode-cheek contact and in the electrode is determined from a formula:

$$I_{el} = I_{el} \cdot \left(1 \pm \frac{1 - K_s}{1 + K_s} \right), \quad (5)$$

here I_{el} is the nominal current of the Electrode, A;

- K_s – is the coefficient of symmetry of the current load of the contact jaws; the “+” sign corresponds to the calculation of the current in the sections facing the center of the furnace, and the “-” sign corresponds to the lining.

The electric current flowing below the contact's cheeks to its bottom end is determined from a formula:

$$I_{el} = I_{el} \cdot K_n \quad (6)$$

here I_{el} is the nominal current of the electrode, A;

K_n – is the ratio of the current density in the zone facing the center of the Furnace (to the lining) to the average current density in the Electrode. The coefficient K_n is determined by the method [6] and

takes into account the influence of the proximity coefficient on the current distribution in the cross section of the electrodes for a three-phase current system.

The calculation of the temperature field of the electrode is carried out in two stages: I – with boundary conditions and currents for the parts of the electrode facing to the center of the smelting furnace; II – with boundary conditions and currents for the parts of the electrode facing to the lining.

Conclusion. The goal of the work is to set the task of developing modern mathematical model of the secondary current network of the electric furnace which could improve the electrical parameters of the secondary current supply. The paper analyzes the main features of the mathematical model of the secondary network of the smelting furnace, identifies the stages of development and formulates the main assumptions and simplifications that could be accepted while creating this model.

References

1. Gasik M.I. Self-baking electrodes in ore-smelting furnaces/ M. I. Gasik – M: Metallurgy, 1984 – 248 p.
2. Rozenberg V.L. Razrabotka matematicheskoy modeli i raschety na EVM rezhimov ekspluatatsii samoobzhigayushchikhsya elektrodov ferrosplavnykh elektropechey/ V.L. Rozenberg, T.G. Fridman, S.V. Bashlykov// Elektrotekhn. prom – nost'. Ser. Elektrotermiya. – 1977.– № 1.– Pp.2–4.
3. Gorbenko V. I. Issledovaniye teplovoy raboty samoobzhigayushchikhsya elektrodov rudovosstanovitel'nykh elektropechey metodom matematicheskogo modelirovaniya: Avtoref. dis. ... kand. tekhn.nauk: 05.14.04 / Moskovskiy vecherniy metallurgicheskii in-t. – M., 1982. – 20p.
4. Grinshpunt A.G. Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnykh poley samoobzhigayushchikhsya elektrodov rudovosstanovitel'nykh pechey / A.G. Grinshpunt, A.A. Shmukin, I.V. Gendin // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. - 1999. - №5. - Pp.7-11.
5. Roos H. Thermomechanical analysis of raw materials used in the production of Soderberg electrode paste/ Roos H. // MSc thesis. North West University. – 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687513001209>
6. Meyjes, R.P. Advanced modelling and baking of electrodes/ R.P. Meyjes, J. Venter, van Rooyen U. // In: The Twelfth International Ferroalloys Congress, June 6–9, 2010, Helsinki, Finland.– Pp. 779–788.
7. Determining the baking isotherm temperature of Söderberg electrodes and associated structural changes Author links open overlay panelL.ShokoJ.P.BeukesC.A.Strydom Minerals Engineering, August 201345 (2013), Pp. 33-39.
8. Filimonenko N.N., Yakovenko V.V. Issledovaniye teplovykh usloviy raboty samoobzhigayushchegosya elektroda // Visn. Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalya. – 2002. – №8(54). – Pp.141 – 146.
9. Grinshpunt A.G. Research of the operation modes of self-baking electrodes of high-power electric ore-smelting furnaces AT PJSC “Nikopol ferroalloy plant”/ A.G. Grinshpunt., Yu.B. Dedov // The Fourteenth International Ferroalloys Congress. - 2015. – Pp. 358-366.

Література

1. Гасик М.І. Самообжигаются электроды в ферросплавных печах / М. І. Гасик - М: Металлургия. – 1984. – 248 с.
2. Розенберг В.Л. Разработка математической модели и расчеты на ЭВМ режимов эксплуатации самообжигаются электродов ферросплавных электропечей/ В.Л. Розенберг, Т.Г. Фридман, С. В. Башлыков // Электротехн. пром – ность. Сер. Электротермия. – 1977.– № 1.– С.2–4.
3. Горбенко В. И. Исследование тепловой работы самообжигаются электродов рудовосстановительных электропечей методом математического моделирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Московский вечерний металлургический ин-т. – М., 1982. – 20с.
4. Гриншпунт А.Г. Математическое моделирование температурных полей самообжигаются электродов рудовосстановительных печей/ А. Г. Гриншпунт., А. А. Шмукин., И. В. Гендин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – №5. – С.7–11.
5. Roos H. Thermomechanical analysis of raw materials used in the production of Soderberg electrode paste/ Roos H. // MSc thesis. North West University. – 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687513001209>
6. Meyjes, R.P. Advanced modelling and baking of electrodes/ R.P. Meyjes, J. Venter, van Rooyen U. // In: The Twelfth International Ferroalloys Congress, June 6–9, 2010, Helsinki, Finland.– Pp. 779–788.
7. Determining the baking isotherm temperature of Söderberg electrodes and associated structural changes Author links open overlay panelL.ShokoJ.P.BeukesC.A.Strydom Minerals Engineering, August 201345 (2013), Pp. 33-39.
8. Филимошенко Н.Н., Исследование тепловых условий работы самообжигается электрода/ Н.Н. Филимошенко, В.В. Яковенко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2002. – №8(54). – С.141 – 146.
9. Grinshpunt A.G. Research of the operation modes of self-baking electrodes of high-power electric ore-smelting furnaces AT PJSC “Nikopol ferroalloy plant”/ A.G. Grinshpunt., Yu.B. Dedov // The Fourteenth International Ferroalloys Congress. - 2015. – Pp. 358-366

Філімошенко Н. М., Філімошенко К. В. Аналіз можливості удосконалення базової математичної моделі електрода для рудовідновлювальної печі

У статті проаналізовано математичну модель електрода, що сам спікається, яку обрано за базову. Визначено її переваги та недоліки. Запропоновано критерії для створення більш досконалої математичної моделі для вирівнювання теплового поля електрода.

Завдання розрахунку теплового поля вирішується методом елементарних теплових балансів електрода. Для цієї мети змодельована площа розділена на кільцеві (циліндричні) елементи по радіусу та висоті електрода.

Ключові слова: математична модель, електрод, що сам спікається, електричний струм електрода, теплове поле.

Филимошенко Н. Н., Филимошенко К. В. Анализ возможности усовершенствования базовой математической модели электрода для рудовосстановительной печи

В статье анализируется математическая модель самоспекающегося электрода, которая определена в ка-

честве базовой. Оценены её достоинства и недостатки. Предложены критерии для создания более совершенной математической модели для выравнивания теплового поля электрода.

Задача расчета теплового поля решается методом элементарных тепловых балансов электрода. Для этого моделируемая область разбивается на кольцевые (цилиндрические) элементы по радиусу и высоте электрода.

Ключевые слова: математическая модель, самоспекающийся электрод, электрический ток электрода, тепловое поле.

Філімоненко Ніна Миколаївна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Філімоненко Костянтин Вадимович – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Стаття подана 29.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-58-65>

УДК 62-83

ДИНАМІКА «МАГНІТНОГО» ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

Шевченко І.С., Морозов Д.І.

DYNAMIC OF "MAGNETIC" BRAKING OF INDUCTION MACHINE

Shevchenko I.S., Morozov D.I.

Серед багатьох режимів гальмування асинхронної машини (АМ) за участю електромеханічних процесів в ній особливе місце займає такий, коли живлення АМ від стороннього джерела відсутнє. Динаміка гальмівного процесу при короткому замиканні статорних обмоток є дуже складною. Це пов'язано зі складними електромеханічними процесами, а також не лінійністю математичної моделі самої машини. У статті розглянуто динаміку «магнітного» гальмування асинхронної машини. Основна увага направлена на аналітичний пошук меж існування процесу у просторі «швидкість ротора – гальмівний момент» при різних початкових умовах, хоч і з певним наближенням до реальних результатів. У випадку «магнітного» гальмування (МГ) статорні кола короткозамкнені, і в них може протікати як змінна за величиною складова постійного струму від попереднього режиму (до короткого замикання), так і змінна за величиною і частотою складова від трансформаторного зв'язку з роторними обмотками. Представлено математичний опис магнітного гальмування. Цифровим моделюванням отримані сімейство динамічних характеристик (фазових портретів) МГ при різних початкових умовах, та перехідні процеси МГ при цих же умовах. Аналіз результатів показує відмінність квазістатичних і динамічних характеристик в межах 18-20%, що можна вважати задовільним для наближених розрахунків. Проведено порівняння розробленого підходу з реальними характеристиками, показано що підхід дозволяє наближено розрахувати показники динамічних механічних характеристик АМ при магнітному гальмуванні. Отримані залежності максимального значення гальмівного моменту від відносної початкової швидкості і початкового струму статора. Виявлено, що вплив на максимальне значення гальмівного моменту від трансформаторного зв'язку сильніше ніж від струму, індукованого нерухомих магнітним потоком.

Ключові слова: магнітне гальмування, асинхронна машина, механічні характеристики

Вступ. Серед багатьох режимів гальмування асинхронної машини (АМ) за участю електромеханічних процесів в ній особливе місце займає такий, коли живлення АМ від стороннього джерела відсут-

не. Його можна розглядати як аварійний, оскільки він виникає при короткому замиканні статорних обмоток з одночасним відімкненням АМ від джерела живлення за допомогою захисних пристроїв (автоматичних вимикачів, плавких запобіжників та інш.).

Постановка задачі дослідження. Динаміка гальмівного процесу при короткому замиканні статорних обмоток є дуже складною. Це пов'язано зі складними електромеханічними процесами, а також не лінійністю математичної моделі самої машини. У відомих джерелах [1,2] основна увага приділялась, в основному, уточненню процесів в машині та їх математичної моделі, і майже немає інформації про межі існування процесу у просторі «швидкість ротора – гальмівний момент» при різних початкових умовах. В роботі, що пропонується, основна увага направлена на аналітичний пошук цих меж, хоч і з певним наближенням до реальних результатів.

Мета роботи розробка методу для розрахунків показників динамічних механічних характеристик АМ при магнітному гальмуванні.

Процес дослідження та його результати. Оскільки обмотки машини є накопичувачами електромагнітної енергії, то магнітне поле АМ, завдяки замкненим обмоткам, не може зникнути миттєво, а зменшується (загасає) поступово у часі. При цьому через однаковий закон змінення струмів у статорних колах вектор магнітного потоку перестає обертатись у просторі (миттєво зупиняється), що змінює знак ковзання ротора відносно магнітного поля АМ, на протилежний (ротор обганяє останнє). Це є поштовхом на генерацію ЕРС роторних обмоток (відповідно і струмів) зворотного напрямку, а значить, і гальмівного моменту на валу.

Описане вище нагадує процес електродинамічного гальмування асинхронного (синхронного) генератора при збудженні його постійним струмом, який створює нерухомих відносно статора (ротора) магнітний потік.

Відмінність полягає в тому, що незмінний струм збудження статора (для АМ) утримує магнітний потік статора нерухомим у просторі, а роторні струми, завдяки змінним їх частотам та швидкості ротора створюють також нерухомий у просторі потік, який не може генерувати в нерухомих обмотках статора ЕРС і струми. Іншими словами, в цьому випадку статорні обмотки «живляться» від джерела постійного струму і трансформаторного зв'язку між ними і роторними немає, тобто по синусоїдальній складовій статорні кола розімкнені.

У випадку ж «магнітного» гальмування (МГ) – статорні кола короткозамкнені, і в них може протікати як змінна за величиною складова постійного струму від попереднього режиму (до короткого замикання), так і змінна за величиною і частотою складова від трансформаторного зв'язку з роторними обмотками (рис. 1).

Завдяки перемінним складовим струмів в статорних обмотках магнітний потік, що створюється ними не може бути нерухомим і починає збільшувати швидкість свого обертання від нуля до швидкості ротора (див. рис. 1). При цьому рух магнітного поля у просторі стає нерівномірним, оскільки при «втягуванні» протилежного полюса рухомого поля в нерухомий його швидкість різко збільшується, а при його виході – навпаки зменшується. Тобто, магнітне поле рухається «ривками» (див. рис. 2), як це спостерігається у випадку з формуванням коливальних полів [1].

Таким чином, в АМ йдуть два процеси взаємодії якірного (роторного) струму – з постійним за напрямком але змінним (загасаючим) струмом від попереднього режиму та змінним за величиною і характером струмом від трансформаторного зв'язку з ротором. Оскільки при МГ АМ працює в зоні великих значень ковзання ротора та сильної розмагнічувальної дії його обмоток, то магнітна система АМ ненасичена і можна використовувати принцип суперпозиції для визначення величини гальмівного моменту.

Таким чином, в АМ йдуть два процеси взаємодії якірного (роторного) струму – з постійним за напрямком але змінним (загасаючим) струмом від попереднього режиму та змінним за величиною і характером струмом від трансформаторного зв'язку з ротором. Оскільки при МГ АМ працює в зоні великих значень ковзання ротора та сильної розмагнічувальної дії його обмоток, то магнітна система АМ ненасичена і можна використовувати принцип суперпозиції для визначення величини гальмівного моменту.

Визначальним фактором в обох процесах є величина струму статора I_1 від попереднього режиму. Важливо знати закон змінення його у часі. Для цього розглянемо схему заміщення АМ при певній швидкості обертання ротора $v = \omega / \omega_0$ (див. рис. 2).

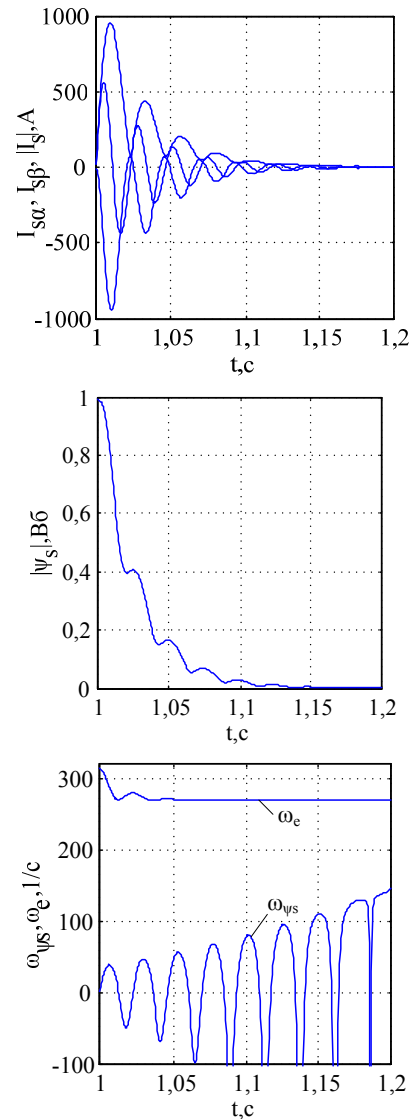


Рис. 1. Криві струмів і швидкостей при МГ:

$$i_s = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2} \text{ – модуль струму статора;}$$

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – складові статорного струму по осях « α » і « β »;

$\omega, \omega_{\psi s}$ – швидкості обертання ротора та вектора статорного потокозчеплення

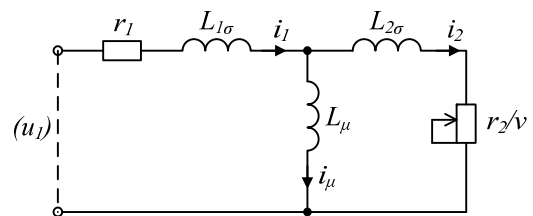


Рис. 2. Схема заміщення однієї фази АМ для модуля узагальненого вектора струму статора: r_1, r_2 – величини активних опорів обмоток статора і ротора; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності обмоток статора і ротора від потоків розсіювання; L_{μ} – індуктивність обмоток статора від основного потоку

Всі параметри і струми АМ приведені до обмотки статора.

Операторні рівняння, що описують процеси в схемі:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_\mu + i_2 \\ i_1 r_1 (1 + T_{1\sigma} p) + i_\mu r_1 T_\mu p &= 0 \\ i_1 r_1 (1 + T_{1\sigma} p) + i_2 \left(\frac{r_2}{v} \right) (1 + T_{2\sigma} p) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$T_{1\sigma} = L_{1\sigma} / r_1, \quad T_{2\sigma} = L_{2\sigma} / r_2, \quad T_s = T_\mu + T_{1\sigma} = L_s / r_1,$$

де $T_{1\sigma}, T_{2\sigma}$ – «малі» електромагнітні сталі часу статорної та роторної обмоток АМ;

T_s, T_μ – електромагнітні сталі часу статорної обмотки при нехтуванні втратами в сталі статора.

Рівняння для загасаючої складової статорного струму у цьому випадку має вигляд:

$$i_1(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} = C_1 e^{\frac{t}{T_{e1}}} + C_2 e^{\frac{t}{T_{e2}}} \quad (2)$$

де T_{e1}, T_{e2} – умовно «мала» та «велика» сталі часу процесу спадання статорного струму (див. рис. 1)

$$p_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4a}}{2a}, \quad b = (T_{1\sigma} + T_{2\sigma}) + \left(\frac{r_1 v}{r_2} + 1 \right) T_\mu$$

$$a = T_{1\sigma} T_{2\sigma} + \left(\frac{r_1 v}{r_2} T_{1\sigma} + T_{2\sigma} \right) T_\mu; \quad T_{e1,2} = -\frac{1}{p_{1,2}};$$

$C_{1,2}$ – сталі, що визначаються початковими умовами процесу, тобто

$I_1(0) = I_{1H}$ – початкове (перед к.з.) ефективне значення статорного струму;

$$I_1'(0) = \left(\frac{dI_1}{dt} \right)_{t=0} - \text{початкове значення першої похідної струму статора, з (1) одержимо}$$

з (1) одержимо

$$I_1'(0) = -\frac{(r_1 T_\mu + r_2 T_{2\sigma}) I_1(0) + \frac{r_2}{v} T_\mu I_2(0)}{r_1 T_{1\sigma} T_\mu + r_2 T_s T_{2\sigma}}. \quad (4)$$

Враховуючи, що $L_\mu \ll (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})$, тобто $T_\mu \ll (T_{1\sigma} + T_{2\sigma})$, та $I_2(0) = I_1(0)$, вираз (4) з достатньою точністю можна подати так

$$I_1'(0) \cong -I_{1H} \frac{r_1 + r_2}{L_{1\sigma} + L_{2\sigma}} = -\frac{I_{1H}}{T_{12}}.$$

Тоді

$$C_1 = I_{1H} - C_2; \quad p_1 C_1 + p_2 C_2 = -\frac{I_{1H}}{T_{12}};$$

$$(p_2 - p_1) C_2 = -I_{1H} \left(\frac{1}{T_{12}} + p_1 \right)$$

$$C_1 = I_{1H} \frac{1/T_{12} + p_2}{p_2 - p_1}; \quad C_2 = -I_{1H} \frac{1/T_{12} + p_1}{p_2 - p_1},$$

$$i_1(t) = \frac{I_{1H}}{T_{12}(p_2 - p_1)} \left[(p_2 T_{12} + 1) e^{\frac{-t}{T_{e1}}} - (p_1 T_{12} + 1) e^{\frac{-t}{T_{e2}}} \right] \quad (5)$$

На початковій стадії процесу МГ суттєвою є друга складова в кривій струму $i_1(t)$, оскільки вона «втримує» магнітний потік статора нерухомим у просторі і цим реалізує класичне динамічне гальмування АМ. Для одержання виразу електромагнітного гальмівного моменту розглянемо векторну діаграму АМ у цьому режимі (див. рис. 3)

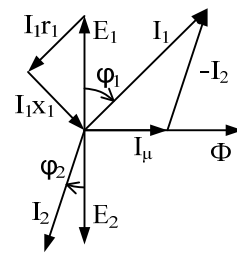


Рис. 3. Векторна діаграма АМ

$$I_1 \sin \varphi_1 = I_2 \sin \varphi_2 + I_\mu \quad (6)$$

$$I_1 \frac{X_1}{Z_1} = I_2 \frac{X_2 v}{Z_2} + I_\mu,$$

$$I_\mu = \frac{E_1}{X_\mu} = \frac{E_2}{X_\mu v} = \frac{I_2 \cdot Z_2}{X_\mu v} = I_2 \frac{(r_2^2 + X_2^2 v^2)^{1/2}}{X_\mu v}$$

Взявши квадрати з лівих та правих частин рівнянь (6) та склавши їх, одержимо після перетворень:

$$I_1^2 = I_2^2 + I_\mu^2 + 2I_2 I_\mu \sin \varphi_2$$

$$I_1^2 = I_2^2 \left[1 + \frac{r_2^2 + X_2^2 v^2}{X_\mu^2 v^2} + 2X_2 X_\mu v \right] \frac{1}{X_\mu^2 v^2}$$

$$I_2^2 = I_1^2 \frac{X_\mu^2 v^2}{r_2^2 + (X_2 + X_\mu)^2 v^2} \quad (7)$$

Електромагнітний момент

$$M_G = \frac{3}{\omega_0} \left(\frac{r_2}{v} \right) \frac{I_1^2 X_\mu^2 v^2}{r_2^2 + (X_2 + X_\mu)^2 v^2} \quad (8)$$

по v має екстремум M_{m1} , який спостерігався б при v_{m1} (якщо не враховувати змінність $I_1(t)$):

$$v_{m1} = \frac{r_2}{X_2 + X_\mu} = \frac{r_2}{X_r}$$

$$M_{m1} = \frac{3}{2\omega_0} \frac{I_1^2(t) X_\mu^2}{X_2 + X_\mu} = \frac{3I_1^2 X_\mu k_r}{2\omega_0} \quad (9)$$

Виразу $M(v, I_1)$ враховуючи (9), можна надати такого вигляду

$$M_{\Gamma}(v, I_1) = \frac{2M_{K\Gamma}}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}} \quad (10)$$

Це повторює рівняння механічної характеристики (МХ) АМ при класичному динамічному гальмуванні (збудженні її постійним струмом). При МГ цей струм має змінну величину у часі. Тому МХ для цього випадку складається з безкінечної кількості МХ за (10) коли реалізується плавний перехід з однієї на іншу, як це показано на рис. 4–5 для чотирьох фіксованих значень $I_1(t)$ ($I_{I1}, I_{I2}, I_{I3}, I_{I4} = 0$)

Скористуємося одержаними рівняннями для аналізу механічних перехідних процесів в ЕП з АМ в режимі МГ при відсутності навантаження на валу

$$-M_{\Gamma}(t) = J \frac{dv}{dt} \omega_0; J \omega_0 \frac{dv}{dt} = \frac{-2M_{K\Gamma}(t)}{(v/v_k + v_k/v)} \quad (11)$$

або враховуючи (2) – (5)

$$T_M \left(\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v} \right) \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2} \left[(T_{1\sigma} p_2 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e1}}} - (T_{1\sigma} p_1 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e2}}} \right]^2, \quad (12)$$

де $T_M = J \omega_0 / (2M_{K\Gamma})$ – електромеханічна (механічна) стала часу електропривода

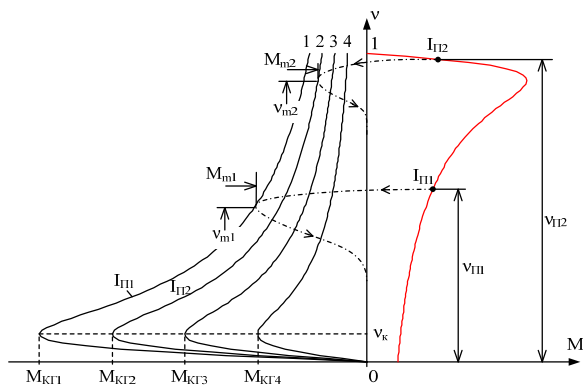


Рис. 4. Сімєство МХ:

I_{I1}, I_{I2} – ефективні значення струмів статора на момент короткого замикання статорних обмоток; $M_{K\Gamma1}, M_{K\Gamma2}$ – величини критичних (максимальних) моментів АМ, що відповідають струмам I_{I1}, I_{I2} , якби їх величини залишались сталими у часі (як при класичному динамічному гальмуванні)

$$M_{K\Gamma} = \frac{3}{2\omega_0} K_r X_{\mu} I_{II}^2, I_{II} = I_1 (t=0) \quad (13)$$

тоді

$$M_{K\Gamma} = M_{K\Gamma} \frac{1}{T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2} \times \left[(T_{1\sigma} p_2 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e1}}} - (T_{1\sigma} p_1 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e2}}} \right]^2 \quad (14)$$

Процес МГ виникає при $v \square v_k$ (як правило), тому складовою v_k / v без значної втрати точності можна нехтувати і після розділення перемінних в (12) його можна подати так:

$$T_M v (dv) = -\frac{v_k}{T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2} \times \left[(T_{1\sigma} p_2 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e1}}} - (T_{1\sigma} p_1 + 1) e^{\frac{-t}{T_{e2}}} \right]^2 dt \quad (15)$$

Після інтегрування

$$v_{II}^2 - v_i^2 = \frac{v_k / T_M}{T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2} (T_{e1} (T_{1\sigma} p_2 + 1)^2 \cdot e^{\frac{2t}{T_{e1}}} - 4(T_{1\sigma} p_2 + 1)(T_{1\sigma} p_1 + 1) \cdot e^{\frac{T_{e1} + T_{e2}}{T_{e1} T_{e2}}} \cdot \frac{T_{e1} T_{e2}}{T_{e1} + T_{e2}} + T_{e2} (T_{1\sigma} p_1 + 1)^2 \cdot e^{\frac{2t}{T_{e2}}})$$

Тобто

$$v_i = v(t) =$$

$$\left\{ v_{II}^2 + \frac{v_k}{T_M T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2} \left[T_{e1} (T_{1\sigma} p_2 + 1)^2 \cdot e^{\frac{2t}{T_{e1}}} - 4(T_{1\sigma} p_2 + 1)(T_{1\sigma} p_1 + 1) \cdot e^{\frac{T_{e1} + T_{e2}}{T_{e1} T_{e2}}} \cdot \frac{T_{e1} T_{e2}}{T_{e1} + T_{e2}} + T_{e2} (T_{1\sigma} p_1 + 1)^2 \cdot e^{\frac{2t}{T_{e2}}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

де $t = t_i, v_i = v$ – миттєві (плинні) значення часу від початку КЗ та швидкості (у відносних одиницях), що відповідають цьому часу.

Діапазон існування МГ по швидкості ($v_{II} \div v_{min}$):

$$v_{min} = v(t) |_{t=t_s=v(t_s)}, \quad (17)$$

де $t = t_s$ – тривалість загасання струмів у статорних обмотках АМ (намагнічувальних контурах).

Вона визначається «повільною» складовою статорного струму $I_1(t)$, а саме сталою часу $T_{e1} = -1/p_1$, тобто $t_3 = (3 \div 4)T_{e1}$.

Для визначення діапазону змінення гальмівного моменту АМ в режимі МГ необхідно дослідити МХ на предмет залежності величину максимального моменту M_m від різних факторів (v , I_{II} , T_e)

$$M_G(v, t) = \frac{3K_r X_\mu I_{II}^2}{2\omega_0 T_{1\sigma}^2 (p_2 - p_1)^2 (v/v_k + v_k/v)} \times \left[(T_{1\sigma} p_2 + 1) e^{-\frac{t}{T_{e1}}} - (T_{1\sigma} p_1 + 1) e^{-\frac{t}{T_{e2}}} \right] \quad (18)$$

Підставляючи в (16) та (18) один і той же час t , можна одержати сімейство точок МХ у режимі МГ, з якого визначається M_m . Маючи МХ для різних факторів робиться висновок про їх вплив на діапазон змінення M_G . Це достатньо трудомісткий процес. Хотілося б мати аналітичну оцінку впливу v , I_{II} , T_e на величину M_m . Необхідно зауважити, що перша (початкова) фаза режиму МГ, на якій спостерігається максимум моменту гальмування, формується «швидкою» складовою (якірного) статорного струму, тобто сталою часу T_{e2} .

У цьому випадку вирази (16) та (18) можна замінити більш простим (звичайно ж, з втратою точності):

$$v(t) \cong \left[v_{II}^2 + v_k \frac{T_{e2}}{T_M} \left(e^{-\frac{2t}{T_{e2}}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$M_G(v, t) \cong \frac{3I_{II}^2 e^{-\frac{2t}{T_{e2}}} X_\mu^2 r_r v}{\omega_0 [r_r^2 + (X_r v)^2]} \quad (20)$$

Якщо з (19) визначити експоненту $e^{-2t/T_{e2}}$, і підставити в (20), то дослідивши одержаний вираз $M_G(v)$ на екстремум, можна визначити вплив різних факторів на величину M_m , тобто діапазон змінення гальмівного моменту

$$e^{-\frac{2t}{T_{e2}}} = \frac{v_{II}^2 - v^2}{v_k} \gamma_T + 1 = \left(\frac{v_{II}^2 - v^2}{v_k} \gamma_T + 1 \right), \quad (21)$$

$$M_G(v) = \frac{3I_{II}^2 X_\mu^2 r_r v}{\omega_0 [r_r^2 + (X_r v)^2]} \left(\frac{v_{II}^2 - v^2}{v_k} \gamma_T + 1 \right), \quad (22)$$

де $\gamma_T = T_M / T_{e2}$ – співвідношення (кратність) електромеханічної та електромагнітної сталих часу.

Дослідження (22) на екстремум ($\frac{\partial M}{\partial v} = 0$), призводить до бікватратного рівняння типу:

$$Av_m^4 + Bv_m^2 + C = 0, \quad (23)$$

де $A = -X_r^2 \gamma_T$; $B = -3X_r^2 v_{II}^2 \gamma_T$;

$$C = r_r^2 (v_k^2 + v_{II}^2 \gamma_T) \quad (24)$$

Рішення цього рівняння дає корінь:

$$v_m = \left[-\frac{3}{2} v_{II}^2 + \sqrt{9v_{II}^4 + r_r^2 (v_k^2 + v_{II}^2 \gamma_T) / X_r^2 \gamma_T} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (25)$$

підставивши який у (22) одержимо вираз для максимального значення M_m гальмівного моменту АМ при відомих параметрах (r_r , X_r , X_μ):

$$M_m(I_{II}, v_{II}, v_m, \gamma_T) = \frac{3I_{II}^2 X_\mu^2 r_r v_m}{\omega_0 [r_r^2 + (X_r v_m)^2]} \left(\frac{v_{II}^2 - v_m^2}{v_k} \gamma_T + 1 \right). \quad (26)$$

Для порівняння результатів квазістатичної МХ при МГ з реальною динамічною скористаємося математичною моделлю АМ для цього випадку [2, (1.188)]. На моделі досліджувався двигун 4А225М2У3 (55кВт). На рис. 5 показане сімейство динамічних характеристик (фазових портретів) МГ при різних початкових умовах, тобто при різних $I_{II}(v_{II})$ та перехідні процеси МГ при цих же умовах.

Аналіз результатів показує відмінність квазістатичних і динамічних характеристик в межах 18-20%, що можна вважати задовільним для наближених розрахунків.

На рисунку 6 наведені результати дослідження залежностей максимального значення гальмівного монета від відносної початкової швидкості (v_{II}) і початкового струму статора (I_{II}). Перехід в режим МГ здійснювався з усталеного режиму при значеннях швидкості 0,4; 0,6; 0,75; 0,85; 0,95; 1,0 від синхронної. Початкове значення струму статора відповідає усталеному режиму при зміні напруги живлення статора. Таким чином залежності $I_{II}(v_{II})$ є статичними електромеханічними характеристиками двигуна при різних значеннях напруги статора. Як видно з рис. 6 в більшому ступені залежить від початкової швидкості ніж від початкового струму. Це пояснюється тим, що при магнітному гальмуванні є трансформаторний зв'язок між статором і ротором на відміну від традиційного динамічного гальмування з формуванням статором нерухомого потоку. Таким чином, при магнітному гальмуванні в струмі I_{II} є дві складові: одна – еквівалентне значення від усталеного початкового струму статора, друга – пік струму статора від магнітної взаємодії статора і ротора.

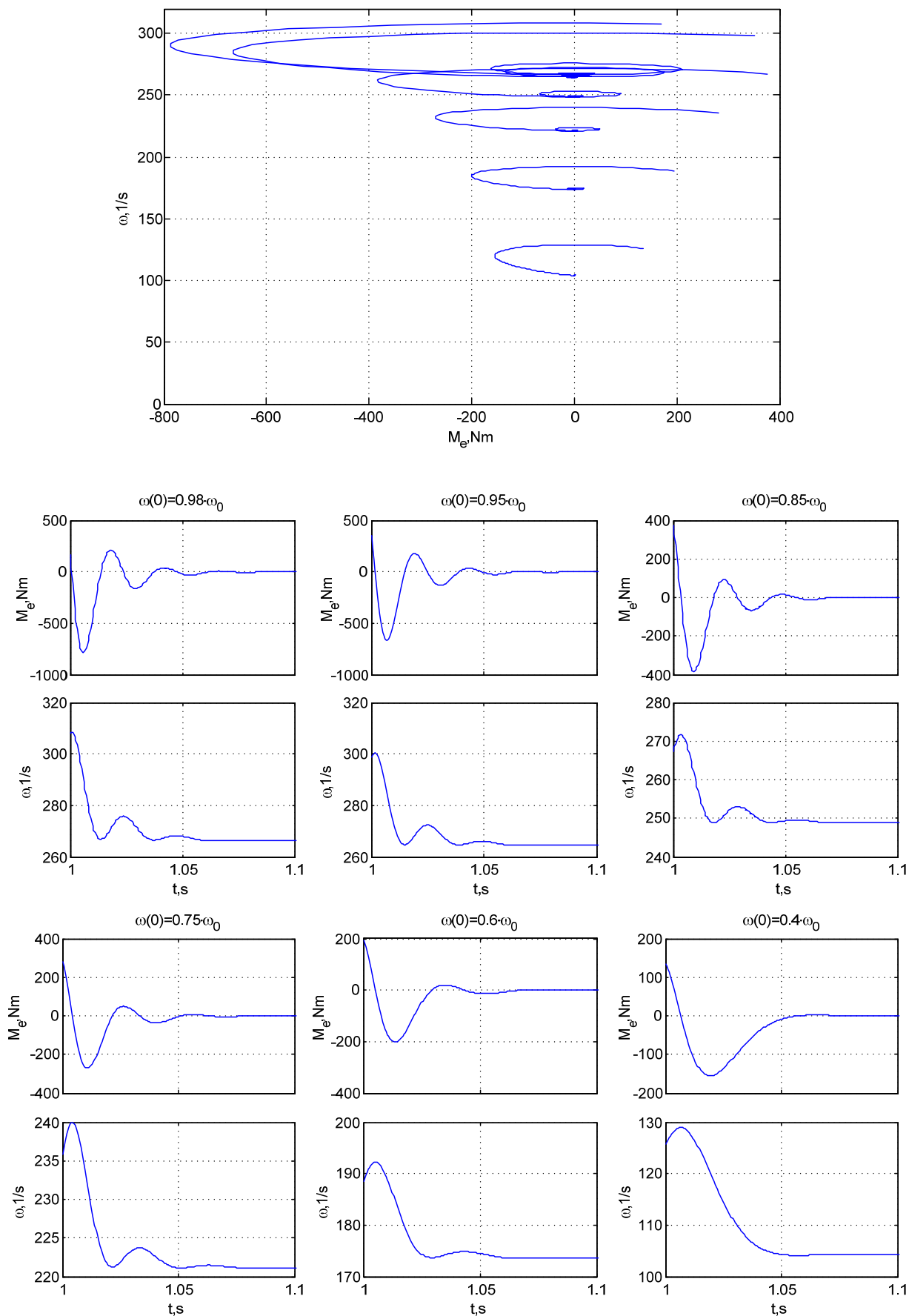


Рис. 5. Фазові траєкторії МГ на базі реальних параметрів АМ і різних початкових струмах та відповідні перехідні процеси

В результаті дослідження виявилось, що вплив на максимальне значення гальмівного моменту від трансформаторного зв'язку сильніше ніж від струму, індукованого нерухомим магнітним потоком. При одержанні виразу (26) для максимального гальмівного моменту трансформаторна взаємодія не враховувалась, тому одержаний вираз дає наближені значення.

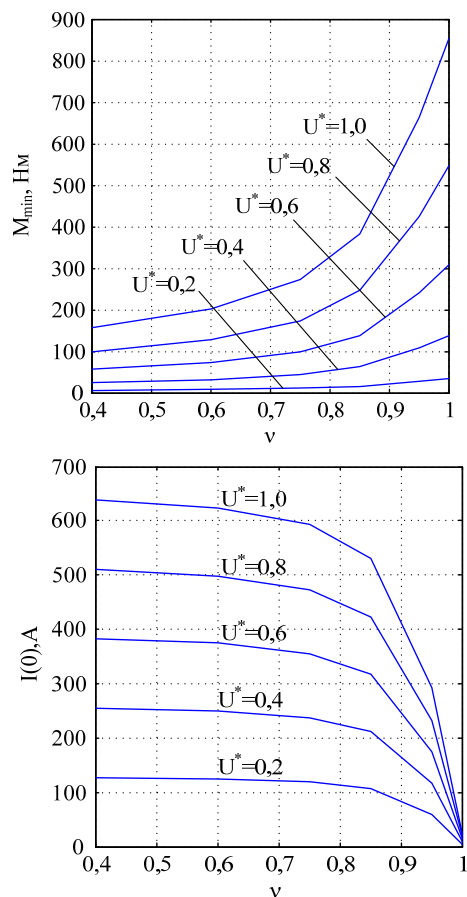


Рис. 6. Залежності максимального значення гальмівного монета від відносної початкової швидкості (v_{II}) і початкового струму статора (I_{II})

Висновок. Запропонований підхід дозволяє наближено з прийнятною точністю розрахувати показники динамічних механічних характеристик АМ при магнітному гальмуванні.

Література

1. Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева. Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 219 с.
2. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка асинхронного електропривода: [навч. посіб.] / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. Київ: Кафедра, 2014. 327 с.

References

1. Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. Elektricheskiye mashiny. Chast 2. Mashiny peremennogo toka. L.: Energiya. 1973. 648 s.

2. Spetsialni pitannya teorii elektroprivoda. Dinamika asinkhronnogo elektroprivoda: [navch. posib.] / I. S. Shevchenko, D. I. Morozov. - Київ: Kafedra. 2014. - 327 p.

Шевченко І.С., Морозов Д.І. Динаміка магнітного торможения в асинхронной машині

Среди многих режимов торможения асинхронной машины (АМ) с участием электромеханических процессов в ней особое место занимает такой, когда питание АМ от постороннего источника отсутствует. Динамика тормозного процесса при коротком замыкании статорных обмоток является очень сложной. Это связано со сложными электромеханическими процессами, а также не линейностью математической модели самой машины. В статье рассмотрена динамика «магнитного» торможения асинхронной машины. Основное внимание направлено на аналитический поиск границ существования процесса в пространстве «скорость ротора - тормозной момент» при различных начальных условиях, хотя и с некоторым приближением к реальным результатам. В случае «магнитного» торможения (МТ) статорные цепи короткозамкнутые, и в них может протекать как переменная по величине составляющая постоянного тока от предыдущего режима (до короткого замыкания), так и переменная по величине и частоте составляющая трансформаторной связи с роторными обмотками. Представлено математическое описание магнитного торможения. Цифровым моделированием получены семейство динамических характеристик (фазовых портретов) МТ при различных начальных условиях, и переходные процессы МТ при этих же условиях. Анализ результатов показывает отличие квазистатических и динамических характеристик в пределах 18-20%, что можно считать удовлетворительным для приближенных расчетов. Проведено сравнение разработанного подхода с реальными характеристиками, показано, что подход позволяет приблизительно рассчитать показатели динамических механических характеристик АМ при магнитном торможении. Получены зависимости максимального значения тормозного момента от относительной начальной скорости и начального тока статора. Выявлено, что влияние на максимальное значение тормозного момента от трансформаторной связи сильнее чем от тока, индуцированного неподвижным магнитным потоком.

Ключевые слова: магнитное торможение, асинхронная машина, механические характеристики

Shevchenko I.S., Morozov D.I. Dynamic of magnetic braking of induction machine

Braking of three phase induction motors is an important issue especially in industrial applications. One of the braking modes of an induction machine, when it is not connected to a power source. The dynamics of the braking process during a short circuit of the stator windings is very complex. This is due to complex electromechanical processes, as well as non-linearity of the mathematical model of three phase induction machine. Known sources have focused on refining the processes in the machine and their mathematical model, and there is almost no information about the boundaries of the process in space "rotor speed - braking torque" under different initial conditions. The article considers the analytical search for the limits of the process in the space "rotor speed - braking torque" under different initial conditions. A mathematical description of the magnetic braking process in an induction machine is presented. Using the developed model, the

characteristics are simulated through by MATLAB/Simulink. The family of dynamic characteristics (phase portraits) of magnetic braking under different initial conditions and magnetic braking transients under the same conditions are obtained by digital modeling. The developed approach is compared with the real characteristics; it is shown that the approach allows to approximate the indicators of the dynamic mechanical characteristics of the induction machine during magnetic braking. Analysis of the results shows the difference between quasi-static and dynamic characteristics in the range of 18-20%, which can be considered satisfactory for approximate calculations. Presents the results of the study of the dependences of the maximum value of the braking torque on the relative initial speed and the initial stator current obtained by simulation. During magnetic braking, there are two components in the current (equivalent value from the steady-state

initial current of the stator, the stator current peak from the magnetic interaction of the stator and rotor.). Finally, this paper it was revealed that effect on the maximum value of the braking torque from the transformer connection is stronger than the current-induced magnetic flux immovable.

Keywords: *magnetic braking, induction machine, mechanical characteristics*

Шевченко І.С. – к.т.н., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля ,

Морозов Д.І. – к.т.н., доцент, dimogozov3@gmail.com

Стаття подана 11.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-66-70>

UDC 681.51:629.7.05

SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM WITH GUARANTEED ACCURACY FOR UNMANNED AIRCRAFT

Zbrutsky O.V., Dovhopoly A.S., Kopysov O.E., Biloborodov O.O.

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З ГАРАНТОВАНОЮ ТОЧНІСТЮ ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Збруцький О.В., Довгополий А.С., Кописов О.Е., Білобородов О.О.

Unmanned aerial vehicle must be controllable and fend off disturbing influences. The quality and effectiveness of fulfilling these tasks are completely determined by the instrumentation system and the software of the control system, which ensures the safety and reliability of the unmanned aerial vehicle. The synthesis of adaptive control algorithms in the presence of disturbances in most cases suggests the use of a certain disturbance model and is associated with the use of integral regulators, which increases the order of the system, and sometimes they are substantially non-linear. Adaptive algorithms use both predictive methods for assessing the dynamics of an object. For the synthesis of the control system, was considered the dynamic model of an unmanned aerial vehicle as a solid. Then the linearized equations of transverse motion can be represented by a system of differential equations. The study performed the synthesis of control system regulators by integrating the equations of the dynamic model of the object for a given control program, made a forecast of the movement of an unmanned aerial vehicle for a certain final period of time. By optimization of program control, was taking into account the restrictions imposed on the control and adjustable variables, the adjustable variables of the forecasting model approach the corresponding control signals on the forecast horizon. At the calculation step, which is a fixed small part of the forecast horizon, the optimal control found was realized and the actual state of the unmanned aerial vehicle was measured at the end of the step. The forecast horizon moves forward one step, and this procedure is repeated. The efficiency of the model predictive control as synthesis method for unmanned aerial vehicle's control system is analyzed. A new synthesis method of adaptive control system with guaranteed accuracy under an arbitrary external disturbance is shown. The method is based on evaluating the effect of disturbances, predicting the behavior of the system and compensating the impact on the control object by the formation of a law for changing the parameters of the additional controller, which does not directly affect the quality of the control system. The results of control system's mathematical modeling for aircraft and multicopter types of unmanned aerial vehicles are presented.

Keywords: automatic control system, guaranteed control accuracy, arbitrary disturbances, adaptation algorithm

1. Introduction. Unmanned aerial vehicle (UAV) as a technical system must be controllable and fend off disturbing influences. The quality and effectiveness of fulfilling these conditions are completely determined by the instrumentation system and the software of the control system, which ensures the safety and reliability of the UAV. Therefore, the synthesis of control laws providing guaranteed accuracy of the aircraft control system under disturbance conditions is an important and urgent task. The synthesis of adaptive control algorithms in the presence of disturbances in most cases suggests the use of a certain disturbance model and is associated with the use of integral regulators, which increases the order of the system [1-4] – the regulators have a high dimension, and sometimes they are substantially non-linear. Adaptive algorithms use both predictive methods for assessing the dynamics of an object.

Without taking into account perturbations, and methods for estimating the current perturbation with a known character of perturbations. Robust methods provide good system properties only in a certain range of perturbations or in stationary modes of operation [5]. In [6] adaptive algorithms were considered to ensure guaranteed accuracy of self-propelled guns, in which the action of the perturbation was estimated from the current values of the system state variables. A number of works are devoted to the use of intelligent control and machine learning methods to solve the problem of accounting for external disturbances [7-9]. However, the task of guaranteed accuracy was not considered. One of the modern approaches to the synthesis of control systems, based on mathematical methods of optimization, which has the relative ease of forming feedback, high adaptive properties, is based on the theory of control of dynamic objects using predictive models [10]. In [11; 12] a regulator structure was proposed that makes it possible to compensate for the effect of unknown perturbations without affecting the quality of self-propelled guns and which

makes it possible to achieve guaranteed control accuracy. An important feature of the UAV control system is the lack of reliable a priori information about the probabilistic characteristics of external disturbances. Therefore, the system of guaranteed accuracy must respond to bad cases of disturbances. The synthesis of an automatic control system (ACS) of guaranteed accuracy with low-order controllers under unknown disturbances remains an urgent task.

2. Article purpose. The article analyzes the effectiveness of using the method of Model Predictive Control (MPC) [10] and new method for the synthesis of self-propelled guns of guaranteed accuracy for UAVs under conditions of unknown disturbances proposed in [11].

3. Model Predictive Control. For the synthesis of the control system, let consider the dynamic model of a UAV as a solid. Then the linearized equations of transverse motion can be represented by a system of differential equations:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_X = -a_{11}\omega_X - a_{12}\omega_Y - a_{13}\beta - b_{11}\delta_{PH} - b_{12}\delta_\gamma; \\ \dot{\omega}_Y = -a_{21}\omega_X - a_{22}\omega_Y - a_{23}\beta - b_{21}\delta_{PH} - b_{22}\delta_\gamma; \\ \dot{\beta} = -a_{31}\omega_X - a_{32}\omega_Y - a_{33}\beta - b_{31}\delta_{PH}; \\ \dot{\gamma} = \omega_X - a_{42}\omega_Y + a_{44}\gamma; \\ \dot{\Psi} = a_{52}\omega_Y - a_{54}\gamma, \end{cases} \quad (1)$$

where β, γ, ψ are the UAV sliding, roll and yaw angle angles; ω is an UAV angular velocity; δ is the elevator rotation angle, U is a control signal. The block diagram of the transverse channel of the control system is shown in Fig. 1.

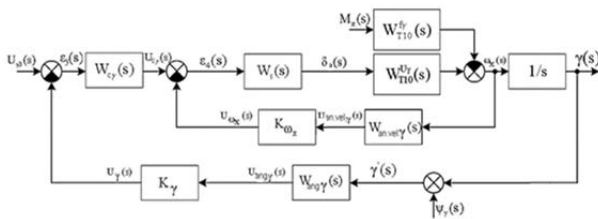


Fig. 1. Blok diagram of transverse channel

Perform the synthesis of control system regulators $W_s(s)$ and $W_c(s)$ according to MPC [10]:

by integrating the equations of the dynamic model of the object (1) for a given program control, we obtain a forecast of the UAV movement over a certain finite period of time – the forecast horizon;

by optimization of program control, taking into account the restrictions imposed on the control and adjustable variables, the adjustable variables of the forecasting model approach the corresponding control signals on the forecast horizon;

at the calculation step, which is a fixed small part of the forecast horizon, the optimal control found is realized and the actual state of the UAV is measured at the end of the step;

the forecast horizon moves forward one step, and this procedure is repeated.

The general view of the control system is shown at Fig. 2.

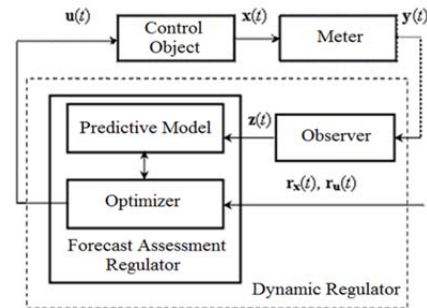


Fig. 2. Feedback control system

The simulation result of the synthesized control system of UAV T-10 [13] (Fig. 2) in MATLAB / Simulink by control action ($U=2.5V$) with a given restriction on the accuracy of stabilization of the pitch angle ($\Delta U=0.125 V$) is shown in Fig. 3.

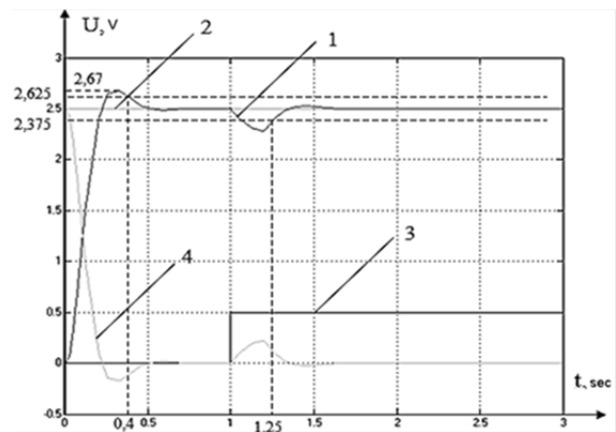


Fig. 3. The transition characteristic of the UAV closed stabilization system in the transverse channel:

- 1 – output signal (pitch angle);
- 2 – defining influence;
- 3 – disturbance signal;
- 4 – control signal

The result of simulation (Fig. 3) shows the compensation of the disturbance; however, the stabilization system does not provide the necessary (in advance predetermined) accuracy of the pitch angle stabilization. Beside this, the need to use complex forecasting algorithms leads to difficulties in real-time algorithms implementation; as the size of the quantization step increases, the control system can go into the mode of self-oscillations, or become unstable.

4. Providing guaranteed control accuracy

In the proposed method for implementing guaranteed control accuracy under the action of perturbations, it is necessary to organize a second feedback. It should include an inverse dynamic model of the control system $W_{reg}(s) = KW^{-1}(s)$ [11; 12] (Fig. 4). Her $W(s)$ is the

transfer function of the dynamic model of the UAV corresponding control channel satisfying the selected optimality criterion. The coefficient K is a function of the angle of deviation of the UAV from a given position. Then the dependence of the controlled quantity $\alpha(s)$ on the perturbation $M_D(s)$ has the form

$$\alpha(s) = \frac{W(s)}{1+K} M_D(s) \quad (2)$$

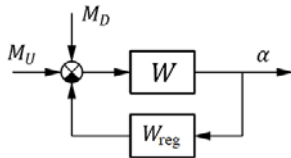


Fig. 4. Control channel with additional controller

Adding a second feedback with inverse dynamic model does not affect the nature of the dynamic processes in the control channel. The feedback coefficient K depends on the difference between the admissible error value of the control channel α_{reg} and the value α that was predicted (extrapolated) in the control algorithm, based on the values of this parameter in the previous steps of the calculations. The general form of the law of variation of the feedback coefficient $K = K_M(t, \alpha)$ can be represented, like [12], in the form:

$$K(t, \alpha) = \begin{cases} 0, & |\alpha| \leq 0.5\alpha_{reg}; \\ \left(\frac{|\alpha|}{\alpha_{reg}} - 1 \right)^{-2}, & |\alpha| > 0.5\alpha_{reg}. \end{cases} \quad (3)$$

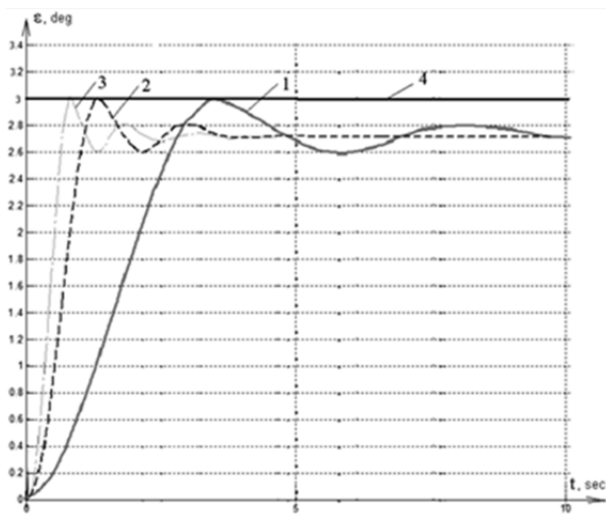


Fig. 5. The error of the control systems in the roll channel: 1 – the magnitude of the disturbance is 1D; 2 – the magnitude of the disturbance is 2D; 3 – the magnitude of the disturbance is 3D; 4 – the maximum allowable value of the roll control error

The dynamics of the synthesized structure control system (3) is modeled using MATLAB / Simulink. The simulation results under the action of disturbances in the control channel of the UAV roll are shown in Fig. 5. As can be seen from the simulation results, the error of the stabilization system is kept within a predetermined guaranteed range (4 – the maximum allowable value of the roll control error) regardless of the magnitude of the disturbing effect.

Conclusions. The proposed method of the control system's synthesis has the following advantages:

ensuring the a priori specified (guaranteed) accuracy of the control system with arbitrary disturbances;

the possibility of using simple extrapolation algorithms makes it easy to implement real-time algorithms;

the method is based on evaluating the effect of disturbances, predicting the behavior of the system and compensating the impact on the control object by the formation of a law for changing the parameters of the additional controller, which does not directly affect the quality of the control system;

with increasing size of the quantization cycle, the control system does not lose stability.

References

- Bobtsov, A. A. & Pyrkin, A. A. (2012). Cancellation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. V. 26. N.4, 302–315. DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.1283>.
- Jafar, A., Fasih Ur Rehman, S., Fazal Ur Rehman, S. & Nisar, A. (2016). A Robust H infinity control law for unmanned aerial vehicle against atmospheric turbulence. In *2nd IEEE International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)*, Islamabad 1–2 November 2016 (pp. 87-92). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRAI.2016.7791234>.
- Marino, R., Santosuosso, G. & Tomei, P. (2007) Adaptive Stabilization of Linear Systems with Outputs Affected by Unknown Sinusoidal Disturbances. *Proc. Eur. Control Conf.*, Kos, Greece. 2007, 129–134. DOI: <https://doi.org/10.23919/ecc.2007.7068499>
- Pyrkin, A., Smyshlyaev, A., Bekiaris-Liberis, N. & Krstic, M. (2010). Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance. *9th IFAC Workshop on Time Delay System*, Prague, Czech Republic.
- Burnashev, V. & Zbrutsky, A. (2019). Robust controller for supersonic unmanned aerial vehicle. *Aviation*. 23, 1, 31-35. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2019.10300>.
- Nikiforov, V. O. (2003). *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensaciei vozmyscheniy*. St.-Peterburg: Nauka (in Russian).
- Ferrari, S. (2013). & Jensenius, M. *Robust and Reconfigurable Flight Control by Neural Networks*. URL: http://fred.mems.duke.edu/LISCpapers/AIAA38208826_AerospaceAtInfotech.pdf.

8. Calise, Anthony J. & Rysdyk, Rolf T. (2013). Adaptive Flight Control using Neural Networks. URL: <http://www.aa.washington.edu/research/afsl/publications/rysdyk1998adaptiveNN.pdf>.
9. Lewis, F. L. (2013). Neural Networks in Feedback Control Systems. URL: http://www.pdx.edu/sites/www.pdx.edu.sysc/files/SySc576_FrankLewisNNsControl.pdf.
10. Krasilschikov, M. N. & Sebryakov, G. G. (2003). Upravlenie i navadenie bespilotnich manevrennich letatelnych apparatov na osnove sovremennich informacionnih tehnologii. Moskva: Fizmatlit (in Russian).
11. Zbrutsky, A. V. & Prach, A. O. (2008). Adaptivnii algoritm odnogo klasu system keruvannia garantovanoi tochnosti pri dovilnich zburenniach. Naukovi visti Igor Sikorsky KPI, no. 2, 26-30. (in Ukrainian). URL: <https://kpi.ua/NV-abstract-08-2>.
12. Zbrutsky, A. V. & Mishchuk, A. S. (2014). Adaptivnii algoritm upravlenia s zadannoi tochnosti pri neopredelionich vneshnich vozmushcheniach. Information Systems, mechanic & control. 10, 170-177 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-380410201442515>.
13. Goltsov, A. S. (2016). Development of a software simulation module UAV T-10 at external disturbing influences. National University "Kharkiv Aviation Institute" (in Ukraine).

Збруцький О.В., Довгополий А.С., Кописов О.Е., Білобородов О.О. Синтез системи управління з гарантованою точністю для безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат повинен бути керованим і відображати заважають впливу. Якість і ефективність виконання цих завдань повністю визначається приладовим комплексом і програмним забезпеченням системи управління, що забезпечує безпеку і надійність безпілотного літального апарату. Синтез алгоритмів адаптивного управління за наявності збурень в більшості випадків передбачає використання певної моделі збурень і пов'язаний із застосуванням інтегральних регуляторів, що збільшує порядок системи, а іноді вони істотно нелінійні. Адаптивні алгоритми використовують обидва методи прогнозування для оцінки динаміки об'єкта. Для синтезу системи управління розглядалася динамічна модель безпілотного літального апарату як твердого тіла. Тоді лінеаризовані рівняння поперечного руху можна представити системою диференціальних рівнянь. У дослідженні виконано синтез регуляторів системи управління шляхом інтегрування рівнянь динамічної моделі об'єкта для заданої програми управління, виконаний прогноз руху безпілотного літального апарату на певний кінцевий період часу. Шляхом оптимізації програмного управління з урахуванням обмежень, що накладаються на керуючі і регульовані змінні, регульовані змінні моделі прогнозування наближаються до відповідних керуючих сигналів на горизонті прогнозу. На кроці розрахунку було реалізовано знайдене оптимальне управління, а в кінці кроку було виміряно фактичний стан безпілотного літального апарату. Горизонт прогнозу зсувається на один крок вперед, і ця процедура повторюється. Проаналізовано ефективність модельного прогнозу управління як методу синтезу системи управління безпілотним літальним апаратом. Представлений новий метод синтезу адаптивної системи управління з га-

рантованою точністю при довільному зовнішньому збуренні. Метод заснований на оцінці впливу збурень, прогнозуванні поведінки системи і компенсації впливу на об'єкт управління шляхом формування закону зміни параметрів додаткового регулятора, що не впливає безпосередньо на якість управління системи. Наведено результати математичного моделювання систем управління безпілотними літальними апаратами літакового і мультикоптерного типу.

Ключові слова: автоматична система управління, гарантована точність управління, довільні збурення, алгоритм адаптації.

Збруцький А.В., Довгополий А.С., Кописов О.Е., Білобородов О.А. Синтез системы управления с гарантированной точностью для беспилотных летательных аппаратов

Беспилотный летательный аппарат должен быть управляемым и отражать мешающие воздействия. Качество и эффективность выполнения этих задач полностью определяется приборным комплексом и программным обеспечением системы управления, обеспечивающей безопасность и надежность беспилотного летательного аппарата. Синтез алгоритмов адаптивного управления при наличии возмущений в большинстве случаев предполагает использование определенной модели возмущений и связан с применением интегральных регуляторов, что увеличивает порядок системы, а иногда они существенно нелинейны. Адаптивные алгоритмы используют оба метода прогнозирования для оценки динамики объекта. Для синтеза системы управления рассматривалась динамическая модель беспилотного летательного аппарата как твердого тела. Тогда линеаризованные уравнения поперечного движения можно представить системой дифференциальных уравнений. В исследовании выполнен синтез регуляторов системы управления путем интегрирования уравнений динамической модели объекта для заданной программы управления, выполнен прогноз движения беспилотного летательного аппарата на определенный конечный период времени. Путем оптимизации программного управления с учетом ограничений, накладываемых на управляющие и регулируемые переменные, регулируемые переменные модели прогнозирования приближаются к соответствующим управляющим сигналам на горизонте прогноза. На шаге расчета, который представляет собой фиксированную небольшую часть горизонта прогноза, было реализовано найденное оптимальное управление, а в конце шага было измерено фактическое состояние беспилотного летательного аппарата. Горизонт прогноза сдвигается на один шаг вперед, и эта процедура повторяется. Проанализирована эффективность модельного прогнозирующего управления как метода синтеза системы управления беспилотным летательным аппаратом. Представлен новый метод синтеза адаптивной системы управления с гарантированной точностью при произвольном внешнем возмущении. Метод основан на оценке влияния возмущений, прогнозировании поведения системы и компенсации воздействия на объект управления путем формирования закона изменения параметров дополнительного регулятора, не влияющего напрямую на качество управления системы. Приведены результаты математического моделирования систем управления беспилотными летательными аппаратами самолетного и мультикоптерного типа.

Ключевые слова: автоматическое управление системой, гарантированная точность управления, произвольное возмущение, алгоритм адаптации.

Збруцький Олександр Васильович – д.т.н., професор, завідувач кафедри систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Довгополий Анатолій Степанович – д.т.н., професор, головний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

Кописов Олег Едуардович – молодший науковий співробітник кафедри систем керування літальними апаратами

Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Білобородов Олег Олександрович – к.т.н., провідний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, e-mail: 22bredly@gmail.com

Стаття подана 03.10.2020

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-71-77>

УДК519.711

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВУЗЛА ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ МЕТАНОЛУ

Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Купіна О.А., Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед

MATHEMATICAL MODEL OF THE NODE COOLING AND METHANOL CONDENSATION

Loriya M.G., Tselishev O.B., Kupina O.A., Ghezewi Abdulkhalegn Goma Ahmed

У статті розроблено математичні моделі апаратів повітряного охолодження, що працюють в різних режимах: без включених вентиляторів, з включеними вентиляторами, з включеною системою зрошення. При розробці математичних моделей, враховуючи, що математична модель апарата повітряного охолодження має другий порядок, використано детермінований підхід до моделювання. Обраний тип математичних моделей – детерміновані моделі, що будуються на основі матеріальних та теплових балансів, що дозволяє вирішити задачу розробки динамічної математичної моделі процесу повітряного охолодження газометанольної суміші. При цьому умови охолодження змінюються у широкому діапазоні (повітряне охолодження без обдуву, з обдувом, з водяним зрошенням), а також змінюється агрегатний стан компонентів газометанольної суміші (конденсація парів метанолу).

Для розробки динамічної математичної моделі апарата повітряного охолодження складені рівняння його теплового балансу першої та другої стадії. Отримані рівняння статичних та динамічних математичних моделей. Аналіз результатів дослідження математичної моделі апарата повітряного охолодження дозволяє зробити висновок, що включення вентилятору спричиняє зміну коефіцієнта математичної моделі в 4 раз, а включення системи зрошення – в 6 разів. Визначено залежність коефіцієнта передачі апарата повітряного охолодження від різниці температур між входом теплообмінника та його виходом. Визначено модель з мінімальними коефіцієнтами передачі апарата повітряного охолодження. Запропонований найбільш оптимальний розв'язок оптимізаційної задачі шляхом проведення прямого перерахунку значень температур при усіх можливих комбінаціях включення вентиляторів при поточних умовах. Визначена загальна чисельність комбінацій для чотирьох послідовно включених апаратів повітряного охолодження, яка дозволяє вирішити поставлену оптимізаційну задачу. Запропонована дискретна система управління з моделлю дозволяє стабілізувати температуру на виході вузла охолодження і конденсації метанолу.

Дана система управління з моделлю дозволяє вирішити задачу щодо вдосконалення роботи циклу синтезу метанолу, оптимізації роботи вузла охолодження і конденсації метанолу.

Ключові слова: синтез метанолу, стабілізація температури, математична модель апарата повітряного охолодження, детермінований підхід до моделювання, газометанольна суміш.

Вступ. Технічний аудит виробництва метанолу дозволив визначити його виробничий резерв.

Одним з напрямів вдосконалення роботи циклу синтезу метанолу є оптимізація роботи вузла охолодження і конденсації метанолу. Стабілізація температури газометанольної суміші на виході вузла охолодження і конденсації метанолу дозволить запобігти неконтрольованій зміні перепаду тиску на компресорі синтез-газу, а, відповідно, й неконтрольованій зміні навантаження на колону. Це дозволить уникнути розбалансу всього циклу синтезу метанолу.

Постановка проблеми.

Для стабілізації температури на виході вузла охолодження і конденсації метанолу в роботі запропонована дискретна система управління з моделлю. Для реалізації такої системи насамперед слід розробити математичні моделі апаратів повітряного охолодження, що працюють в різних режимах: без включених вентиляторів, з включеними вентиляторами, з включеною системою зрошення.

Для розв'язання цієї задачі, враховуючи, що ММ АПО має другий порядок, найбільш доцільно використати детермінований підхід до моделювання.

Мета статті. Мета оптимізаційної задачі полягає в тому, щоб визначити значення витрат повітря, що подається від вентиляторів на

оохолодження газометанольної суміші, на кожний з апаратів повітряного охолодження (АПО), при якому на виході АПО встановиться задана температура.

Аналіз досліджень і публікацій. Результати досліджень. При розробці математичної моделі (ММ) приймається припущення, що всі впливи на АПО для охолодження газометанольної суміші мають адитивний характер. Враховуючи, що всі АПО вузла охолодження і конденсації однакові, їх ММ будуть відрізнятися тільки коефіцієнтами моделі та постійними часу [1-3, 7,8].

Однією з задач роботи є розробка динамічної ММ процесу повітряного охолодження газометанольної суміші. При цьому умови охолодження змінюються у широкому діапазоні (повітряне охолодження без обдуву, з обдувом, з водяним зрошенням), а також змінюється агрегатний стан компонентів газометанольної суміші (конденсація парів метанолу). Це обумовило вибір типу ММ – детерміновані моделі, що будуються на основі матеріальних та теплових балансів.

Спрощена функціональна схема технічного рішення наведена на рис.

Для розробки динамічної ММ АПО складемо рівняння його теплового балансу[4-6]. Теплота в АПО передається в 2 стадії:

- 1) від газометанольної суміші трубкам теплообмінника;
- 2) від трубок теплообмінника в навколишнє середовище.

Рівняння теплового балансу першої стадії має вигляд:

$$dq_p = dq_p' + dq_{cm} + dq_{Mp}. \quad (1)$$

Рівняння теплового балансу другої стадії має вигляд:

$$dq_{omd} + dq_{Mm} = dq_{cm}. \quad (2)$$

де dq_p – теплота, що приходить з газометанольною сумішшю.

У результаті отримаємо рівняння статичних ММ, які мають вигляд:

$$Fp \cdot Cp \cdot Tp + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot Tcm = 1) = Fp \cdot Cp \cdot Tp' + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot Tp. \quad (3)$$

$$2) \frac{K \cdot \alpha_n \cdot S_n \cdot Tcc + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot Tcm}{= \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot Tp + \alpha_n \cdot S_n \cdot Tokp.cp}. \quad (4)$$

А також рівняння динамічних ММ, які мають вигляд:

$$Fp \cdot Cp \cdot \Delta Tp + Cp \cdot Tp \cdot \Delta Fp + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot \Delta Tcm = 1) = Fp \cdot Cp \cdot \Delta Tp' + Cp \cdot Tp' \cdot \Delta Fp + m_p \cdot Cp \cdot \frac{dTcm}{dt} + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot \Delta E_s \quad (5)$$

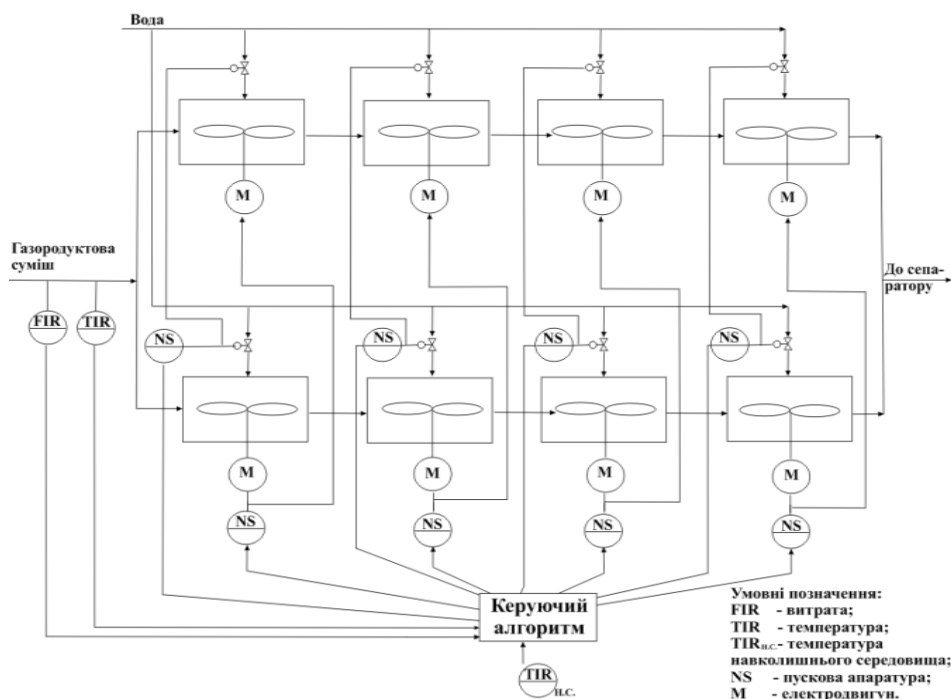


Рис. Схема автоматизації вузла охолодження і конденсації із застосуванням дискретної системи регулювання на базі керуючого алгоритму

$$2) K \cdot \alpha_n \cdot S_n \cdot \Delta T_{cc} + \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot \Delta T_{cm} + m_m \cdot C_m \cdot \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot \Delta T_p + \alpha_n \cdot S_n \cdot \Delta T_{окр.ср.} \quad (6)$$

Якщо записати рівняння (5), (6) у відносній формі та ввести для цього позначення:

$$y1 = \frac{\Delta T_p'}{T_p'}; z1 = \frac{\Delta T_p}{T_p}; z2 = \frac{\Delta T_{cc}}{T_{cc}}; z3 = \frac{\Delta F_p}{F_p}; z4 = \frac{\Delta T_{окр.ср.}}{T_{окр.ср.}}$$

То отримаємо ММ АПО:

$$\tau'' \cdot \frac{d^2 y1}{dt^2} + \tau' \cdot \frac{dy1}{dt} + y1 = K_1 \cdot (\tau_2 \cdot \frac{dz1}{dt} + K_6 \cdot z1) + K_3 \cdot (\tau_2 \cdot \frac{dz3}{dt} + z3) + K_7 \cdot z4 \quad (7)$$

В якості прикладу одержимо коефіцієнтів ММ першого теплообмінника за ходом газометанольної суміші.

1) F_p – витрата газометанольної суміші:

$$F_p = 315000 \frac{нм^3}{час} = 87.5 \frac{нм^3}{с} = 2.591 \frac{м^3}{с} = 52.15 \frac{кг}{с}$$

2) C_p – теплоємність газометанольної суміші:

$$C_p = 504 \frac{Дж}{кг \cdot K}$$

3) C_m – теплоємність матеріалу трубок:

$$C_m = 2590 \frac{Дж}{кг \cdot K}$$

4) T_p – температура газометанольної суміші на виході в теплообмінник:

$$T_p = 150^\circ C = 423 K$$

5) T_p' – температура парогазової суміші на виході теплообмінника:

$$T_p' = 110^\circ C = 383 K$$

6) $T_{окр.ср.}$ – температура навколишнього середовища:

$$T_{окр.ср.} = 20^\circ C = 293 K$$

7) m_p – маса газометанольної суміші, яка накопичується в трубках теплообмінника:

$$m_p = L_{mp} \cdot S_{mp} \cdot n \cdot \rho_{cm}$$

де $L_{тр} = 6$ м – довжина трубок теплообмінника;

$$S_{mp} = \frac{\pi \cdot d_{вн}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.021^2}{4} = 0.000346 \text{ м}^2 \quad \text{– площа}$$

поперечного перетину трубки;

$d_{вн} = 0.021$ м – внутрішній діаметр трубки;

$n = 984$ – кількість трубок в теплообміннику;

$$\rho_{cm} = \frac{P \cdot M_{cm}}{R \cdot T_p} = \frac{5.3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 13.357 \frac{кг}{моль}}{8314 \cdot 423 \text{ К}} = 20.13 \frac{кг}{м^3}$$

$P = 5.3 \cdot 10^6$ Па – тиск в теплообміннику;

$M_{cm} = 13.357 \frac{кг}{моль}$ – молярна маса суміші;

$$m_p = 6 \cdot 0.000346 \cdot 984 \cdot 20.13 = 10.285 \text{ кг};$$

8) m_m – маса трубок теплообмінника:

$$m_m = L_{mp} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_n^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{вн}^2}{4} \right) \cdot n \cdot \rho_{cm} \quad (8)$$

де $d_n = 0.025$ м – зовнішній діаметр трубки;

$$\rho_{cm} = 7800 \frac{кг}{м^3} \quad \text{– густина сталі};$$

$$m_m = 6 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0.025^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0.021^2}{4} \right) \cdot 984 \cdot 7800 = 6655 \text{ кг}$$

9) $S_{вн}$ – площа внутрішньої поверхні теплообмінника

$$S_{вн} = 390 \text{ м}^2$$

10) S_n – площа зовнішньої поверхні теплообмінника

$$S_n = 7500 \text{ м}^2$$

11) $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі від газометанольної суміші до стінок трубок теплообмінника

Газометанольна суміш має наступні теплофізичні властивості: густина $\rho_{cm} = 20.13 \frac{кг}{м^3}$,

в'язкість $\mu_{cm} = 1.762 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, теплопровідність

$$\lambda_{cm} = 0.0867 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}, \text{ теплоємність } C_p = 2590 \frac{Дж}{кг \cdot K}$$

$$\alpha_{вн} = \frac{0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \lambda_{cm}}{d_{вн}} \quad (9)$$

$S = S_{mp} \cdot n = 0.000346 \cdot 984 = 0.34 \text{ м}^2$ – площа поперечного перетину всіх трубок теплообмінника.

$$w = \frac{F_p}{S} = \frac{2.591 \frac{м^3}{с}}{0.34 \text{ м}^2} = 7.621 \frac{м}{с} \quad \text{– швидкість}$$

руху газометанольної суміші в трубках теплообмінника.

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{7.621 \cdot 0.021 \cdot 20.13}{1.762 \cdot 10^{-5}} = 182800 -$$

критерій Рейнольдса;

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}} = \frac{2590 \cdot 1.762 \cdot 10^{-5}}{0.0867} = 0.526 -$$

критерій Прандтля;

$$\alpha_{\text{вн}} = \frac{0.021 \cdot 182800^{0.8} \cdot 0.526^{0.43} \cdot 0.0867}{0.021} = 1066 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

12) $\alpha_{\text{н1}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінок трубок теплообмінника в навколишнє середовище при вимкненому вентиляторі

Повітря має наступні теплофізичні властивості при 20 °С : густина $\rho_{\text{в}} = 1.2 \frac{кг}{м^3}$, в'язкість

$\mu_{\text{в}} = 1.831 \cdot 10^{-5} Па \cdot с$, теплопровідність

$\lambda_{\text{в}} = 0.026 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, коефіцієнт об'ємного

розширення $\beta = 0.003671 К^{-1}$.

$$\alpha_{\text{н1}} = \frac{0.47 \cdot Gr^{0.25} \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \quad (10)$$

Визначимо з рівняння статичної температури стінки:

$$T_{\text{сст}} = \frac{Fp \cdot Cp \cdot T_p' + \alpha_{\text{вн}} \cdot S_{\text{вн}} \cdot T_p}{\alpha_{\text{вн}} \cdot S_{\text{вн}}} - \frac{Fp \cdot Cp \cdot T_p}{\alpha_{\text{вн}} \cdot S_{\text{вн}}} = \frac{2590 \cdot 52.15 \cdot 333 + 1066 \cdot 390 \cdot 423}{1066 \cdot 390} - \frac{2590 \cdot 52.15 \cdot 423}{1066 \cdot 390} = 393 К = 120 °С \quad (11)$$

Розрахуємо значення критерія Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot d_{\text{н}}^3 \cdot \rho_{\text{д}}^2 \cdot (T_{\text{см}} - T_{\text{окр.ср}}) \cdot \beta}{\mu_{\text{в}}^2} = \frac{9.81 \cdot 0.025^3 \cdot 1.2^2 \cdot (120 - 20) \cdot 0.003671}{(1.831 \cdot 10^{-5})^2} = 241700 \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{н1}} = \frac{0.47 \cdot 241700^{0.25} \cdot 0.026}{0.025} = 10.838 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

13) $\alpha_{\text{н2}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінок трубок теплообмінника в навколишнє середовище при включеному вентиляторі.

Повітря має наступні теплофізичні властивості при 40 °С: щільність $\rho_{\text{в}} = 1.125 \frac{кг}{м^3}$, в'язкість

$\mu_{\text{в}} = 1.93 \cdot 10^{-5} Па \cdot с$, теплопровідність

$\lambda_{\text{в}} = 0.028 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, теплоємність $C_{\text{в}} = 1000 \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

$$\alpha_{\text{н2}} = \frac{0.23 \cdot Re^{0.65} \cdot Pr^{0.33} \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \quad (13)$$

$f_{\text{мт}} = 17.56 м^2$ – найменша площа перетину міжтрубного простору.

$V_{\text{в}} = 720000 м^3/г = 200 м^3/с$ – продуктивність вентилятора.

$w = \frac{V_{\text{в}}}{f_{\text{мт}}} = \frac{200 \frac{м^3}{с}}{17.56 м^2} = 11.39 \frac{м}{с}$ – швидкість повітря в міжтрубному просторі.

$Re = \frac{w \cdot d_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}} = \frac{11.39 \cdot 0.025 \cdot 1.125}{1.93 \cdot 10^{-5}} = 16600$ – критерій Рейнольдса.

$Pr = \frac{C_{\text{в}} \cdot \mu_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{1000 \cdot 1.93 \cdot 10^{-5}}{0.028} = 0.689$ – критерій Прандтля.

$$\alpha_{\text{н2}} = \frac{0.23 \cdot 16600^{0.65} \cdot 0.689^{0.33} \cdot 0.028}{0.025} = 126.08 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

14) $\alpha_{\text{н3}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінок трубок теплообмінника в навколишнє середовище при включеній системі зрошення.

Вода має наступні теплофізичні властивості при 20 °С: щільність $\rho_{\text{в}} = 1000 \frac{кг}{м^3}$, в'язкість

$\mu_{\text{в}} = 0.001 Па \cdot с$, теплопровідність $\lambda_{\text{в}} = 0.6 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$,

теплоємність $C_{\text{в}} = 4190 \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

$$\alpha_{\text{н3}} = \frac{0.002 \cdot Re_{\text{нл}}^{0.57} \cdot Pr^{0.4} \cdot \lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{прив}}} \quad (14)$$

$\dot{G} = 3 м^3/г = 3000 кг/г = 0.83 кг/с$ – витрата води.

$\Gamma = \frac{\dot{G}}{2 \cdot L_{\text{мп}}} = \frac{0.83 \frac{кг}{с}}{2 \cdot 6 м} = 0.07 \frac{кг \cdot м}{с}$ – лінійна

щільність зрошення.

$Re_{\text{нл}} = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_{\text{в}}} = \frac{4 \cdot 0.07}{0.001} = 280$ – критерій Рейнольдса.

$$Pr = \frac{C_v \cdot \mu_e}{\lambda_e} = \frac{4190 \cdot 0.001}{0.6} = 6.983 \quad - \text{ критерій}$$

Прандтля.

$$\delta_{прив} = \left(\frac{\mu_e^2}{\rho_e^2 \cdot g} \right)^{0.33} = \left(\frac{0.001^2}{1000^2 \cdot 9.81} \right)^{0.33} = 5.16 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad - \text{ приведена}$$

товщина плівки.

$$\alpha_n 3 = \frac{0.002 \cdot 280^{0.57} \cdot 6.983^{0.4} \cdot 0.6}{5.16 \cdot 10^{-5}} = 1256 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Підставимо набутих значень в рівняння (7) і отримаємо ММ роботи АПО:

1) при вимкненому вентиляторі:

$$3.76 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 19.27 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = 0.63 \cdot (-79.79 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (19.09 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 0.45 \cdot z_4 \quad (15)$$

2) при включеному вентиляторі:

$$1.37 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 7.16 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -1.45 \cdot (12.71 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (6.97 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 1.88 \cdot z_4 \quad (16)$$

3) при включеній системі зрошення:

$$0.19 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 1.16 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -2.47 \cdot (1.03 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (0.96 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 2.59 \cdot z_4 \quad (17)$$

Аналізуючи результати дослідження ММ АПО та ПП можна заключити, що включення вентилятору спричиняє зміну коефіцієнта ММ в 4 раз, а включення системи зрошення – в 6 разів. Крім того, коефіцієнт передачі АПО залежить від різниці температур між входом теплообмінника та його виходом. Тобто можна стверджувати, що для другого за ходом газу теплообмінника, на якому перепад температури буде меншим ніж на першому, ці коефіцієнти будуть меншими, ніж для першого, але більшими, ніж для третього АПО, для якого цей перепад температур буде ще меншим. Самими малими коефіцієнтами будуть коефіцієнти моделі четвертого за ходом газу АПО.

Температуру газометанольної суміші та повітря на виході кожного з теплообмінників можна визначити використавши статичні рівняння, з яких складемо систему.

$$\begin{cases} F_n c_n T_1 = F_n c_n T_2 + \frac{KS(T_1 - T_4 - T_2 + T_3)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}\right)} \\ F_v c_v T_3 + \frac{KS(T_1 - T_4 - T_2 + T_3)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}\right)} = F_v c_v T_4 \end{cases} \quad (18)$$

Для розв'язання системи рівнянь (18) необхідно визначити значення коефіцієнта теплопередачі K .

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{прод}} + \sum r_{cm} \frac{1}{\alpha_{возд}}} \quad (19)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі;

$\alpha_{прод}$ – коефіцієнт тепловіддачі для продукту;

$\sum r_{cm}$ – сума термічних опорів усіх шарів, з яких складається стінка, включаючи шари забруднення;

$\alpha_{возд}$ – коефіцієнт тепловіддачі для повітря.

Визначити температур газометанольної суміші та повітря на виході кожного з теплообмінників розв'яжемо систему рівнянь (18).

$$T_2 = e^{\frac{KS(F_n c_n - F_v c_v)}{F_n F_v c_n c_v}} \cdot F_v c_v T_3 - F_n c_n T_1 + F_v c_v T_1 - F_v c_v T_3 \quad (20)$$

$$T_4 = \frac{e^{\frac{KS(F_n c_n - F_v c_v)}{F_n F_v c_n c_v}} \cdot F_n c_n T_1}{KS(F_n c_n - F_v c_v)} + \frac{e^{\frac{KS(F_n c_n - F_v c_v)}{F_n F_v c_n c_v}} \cdot F_v c_v - F_n c_n}{KS(F_n c_n - F_v c_v)} \cdot F_v c_v T_3 - e^{\frac{KS(F_n c_n - F_v c_v)}{F_n F_v c_n c_v}} \cdot F_n c_n T_3 - F_n c_n T_1 \quad (21)$$

Аналізуючи рівняння (20) та (21), приходимо до висновку, що температура газометанольної суміші на виході АПО залежить майже від усіх технологічних параметрів колони синтезу. Крім

того, залежить від параметрів повітря, яким проводиться охолодження. Ці залежності мають складний характер. Мета оптимізаційної задачі полягає в тому, щоб визначити значення витрат повітря, що подається від вентиляторів на охолодження газометанольної суміші, на кожний з АПО, при якому на виході АПО встановиться задана температура. Враховуючи складність залежностей температури газометанольної суміші на виході АПО від витрати повітря, зворотне рівняння залежності витрати повітря від температури газометанольної суміші на виході АПО буде дуже громіздким, а розв'язання його для заданого значення температури – складним.

Тому для розв'язання оптимізаційної задачі, в роботі запропоновано не отримувати розв'язання у вигляді загального рівняння, а проводити прямий перерахунок значень температур при усіх можливих комбінаціях включення вентиляторів при поточних умовах. Вентилятори на кожному АПО можуть бути включені на третину, дві треті потужності або на повну потужність.

Висновок. Таким чином, для чотирьох послідовно включених АПО загальна чисельність комбінацій дорівнює 256. Враховуючи обчислювальну потужність сучасних ЕОМ, прямий перерахунок рівняння (20) та (21) з 256 значеннями витрат повітря, що подається вентиляторами, для охолодження газометанольної суміші, з подальшим перебором з усіх можливих комбінацій включення вентиляторів, що забезпечують задану температуру, є найбільш простим шляхом розв'язання цієї оптимізаційної задачі.

Література

- «Системи керування з моделлю технологічними об'єктами» монографія /Лорія М.Г., Поркуян О. В., Целищев О.Б., Купіна О.А./ ; під ред. М.Г. Лорія. – Севе-родонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2019. - 173 с.
- Ідентифікація параметрів моделі з використанням то-чок глобальних екстремумів динамічних характе-ристик / М. В. Ананьев, О. Б. Целищев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск, 2012. – № 5. – С. 188–191.
- Разработка комбинированной модели для задач оп-тимизации / Д. Абдалхамид, М. Г. Лорія, П. Й. Елисеев, А. Б. Целищев // Наука и техника (международный научно-технический журнал). – Мн.: БНТУ, 2014. – № 3. – С. 209–213.
- Лорія М. Г. Розробка математичної моделі газового реактора для оптимізації технологічного процесу / М. Г. Лорія // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2018. – № 1(242), Ч. 1. – С. 179–183.
- Lorіia M. Experimental investigation of the method of de-termination of optimal controller settings / M. Lorіia // EURIKA: Physics and Engineering. – 2019. – № 2. – P. 16–22.
- Olah G. Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy/GOlah, A. Goepfert, G. Surya. – Prakash. – 2009. – P. 213–219
- Система керування температурним режимом блочної незольюючої установки АЕС / Р.Б. Медведев, С.Л. Мердух // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Компьютерное моделирование в химии, технологиях и системах развития. – 2013. - № 2/4 (64). – С. 42-45.
- Процессы и аппараты химической технологии. Учеб-ник для вузов./ Н.Н. Смирнов, М.И. Курочкина, А.И. Волжинский, В.А. Плессовских. – СПб.: Химия, 1996. – 400с.

References

- "Control systems with a model of technological objects" monograph / Loria MG, Porkuyan OV, Tselishchev OB, Kupina OA /; ed. M.G. Loria. - Severodonetsk: published by SNU. V. Dalya, 2019. - 173 p.
- Identification of model parameters using points of global extremums of dynamic characteristics / MV Ananiev, OB Tselishchev, MG Loria [etc.] // Questions of chemistry and chemical technology. - Dnepropetrovsk, 2012. - № 5. - P. 188–191.
- Development of a combined model for optimization problems / D. Abdalhamid, M. G. Loria, P. Y. Eliseev, AB Tselishchev // Science and technology (international scientific and technical journal). - Minsk: BNTU, 2014. - No. 3. - P. 209–213.
- Loria MG Development of a mathematical model of a gas reactor for optimization of the technological process / MG Loria // Visnyk of SNU. V. Dahl. - 2018. - № 1 (242), Ch. 1. - P. 179–183.
- Lorіia M. Experimental investigation of the method of de-termination of optimal controller settings / M. Lorіia // EURIKA: Physics and Engineering. – 2019. – № 2. – P. 16–22.
- Olah G. Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy/GOlah, A. Goepfert, G. Surya. – Prakash. – 2009. – P. 213–219
- Temperature control system of the block desalination plant of the NPP / R.B. Medvedev, SL Merdukh // Eastern European Journal of Advanced Technologies. Computer modeling in chemistry, technology and development systems. - 2013. - № 2/4 (64). - P. 42-45.
- Processes and devices of chemical technology. Textbook for universities. / N.N. Smirnov, M.I. Kurochkina, A.I. Volzhinsky, V.A. Plessovskikh. - SPb. : Chemistry, 1996. — 400p.

Лорія М.Г.,Целищев О.Б., Купіна А.А, Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед. Математическая модель охладнения узла и конденсации метанола.

В статье разработаны математические модели аппаратов воздушного охлаждения, работающих в различных режимах без включенных вентиляторов, с включенными вентиляторами, с включенной системой орошения. При разработке математических моделей, учитывая, что математическая модель аппарата воздушного охлаждения имеет второй порядок, использовано детерминированный подход к моделированию. Выбранный тип математических моделей - детерминированные модели, которые строятся на основе материальных и тепловых балансов, позволяет решить задачу разработки динамической математической модели процесса воздушного охлаждения газометанольной смеси. При этом условия охлаждения изменяются в широком диапазоне (воздушное охлаждение без обдува, с обдувом, с водяным орошением), а также изменяется агрегатное состояние компонентов газометанольной смеси (конденсация паров метанола).

Для разработки динамической математической модели аппарата воздушного охлаждения составлены уравнения его теплового баланса первой и второй стадии. Полученные уравнения статических и динамических математических моделей. Анализ результатов исследования математической модели аппарата воздушного охлаждения позволяет сделать вывод, что включение вентилятора вызывает изменение коэффициента математической модели в 4 раза, а включение системы орошения - в 6 раз. Определена зависимость коэффициента передачи аппарата воздушного охлаждения от разницы температур между входом теплообменника и его выходом. Определены модели с минимальными коэффициентами передачи аппарата воздушного охлаждения. Предложено наиболее оптимальное решение оптимизационной задачи путем проведения прямого пересчета значений температур при всех возможных комбинациях включения вентиляторов при текущих условиях. Определена общая численность комбинаций для четырех последовательно включенных аппаратов воздушного охлаждения, которая позволяет решить поставленную оптимизационную задачу. Предложенная дискретная система управления с моделью позволяет стабилизировать температуру на выходе узла охлаждения и конденсации метанола. Данная система управления с моделью позволяет решить задачу по совершенствованию работы цикла синтез метанола, оптимизации работы узла охлаждения и конденсации метанола.

Ключевые слова: синтез метанола, стабилизация температуры, математическая модель аппарата воздушного охлаждения, детерминированный подход к моделированию, газометанольная смесь.

Loriya M.G., Tselishev O.B., Kupina O.A., Ghezewi Abdulkhalegn Goma Ahmed Mathematical model of the node cooling and methanol condensation.

In the article the mathematical models of vehicles of the air cooling, that work in the different modes, are worked out : without the included ventilators, with the included ventilators, with the included irrigation system. At development of mathematical models, taking into account, that the mathematical vehicle model of the air cooling has the second order, the deterministic approach to modeling. Selected type of mathematical models - the determined models that is built on the basis of material and thermal balances that allows to decide development task of dynamic mathematical model of process of the gas-methanol mixture air cooling. Thus cooling terms change in a wide range (air cooling without blowing, with

blowing, with aquatic irrigation), and also the aggregate state of components of gas-methanol mixture (condensation steams of methanol) changes.

For development of dynamic mathematical vehicle model of the air cooling worked out equations its thermal balance of the first and second stage. There were got equalizations of static and dynamic mathematical models. The analysis of research results of mathematical model of the air cooling vehicle allows to draw conclusion, that including to the ventilator causes the coefficient change of mathematical model in 4 times, and including of the system of irrigation - in 6 times. Certainly dependence transmittivity of vehicle of the air cooling from the difference of temperatures between the entrance of heat-exchanger and his exit. A model is certain with the minimum transmittivities of the air cooling vehicle. The most optimal optimization task solution is offered by realization of direct count of values of temperatures at all possible combinations of including of ventilators at current conditions. Certain general quantity of combinations for four consistently included vehicles of the air cooling, that allows to decide the set optimization problem. Offer discrete control system with a model allows to stabilize a temperature on the exit of cooling knot and methanol condensation.

This control system with a model allows to decide a task in relation to perfection of work of methanol synthesis cycle, work optimization of cooling knot and methanol condensation.

Keywords: methanol synthesis, temperature stabilization, mathematical model of an air cooler, deterministic approach to modeling, gas-methanol mixture.

Лорія М.Г. – д.т.н., доцент, професор кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: m.loria@snu.edu.ua.

Целіщев О. Б. – д.т.н., доцент, проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: atp00@ukr.net.

Купіна О.А. – аспірант кафедри «Електронні апарати» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kupina@snu.edu.ua.

Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: atp01@ukr.net.

Стаття подана 05.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-78-83>

УДК 532.135.66.012

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНО-ІМПУЛЬСНИХ ТРЕНДІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ

Стенцель Й. І., Грановський Е. О., Степанов В. С.

INVESTIGATION OF OSCILLATING PULSE TRENDS OF MEASURING PARAMETERS

Stencel J. I., Granovsky E. A., Stepanov V. S.

Значна кількість трендів технологічних параметрів мають коливально-імпульсний характер з достатньо великим розкиданням показань за амплітудою. Це приводить до неправильного визначення вимірювального параметра. Приймалося, що коливально-імпульсний тренд є причиною впливу випадкових факторів. Запропоновано та обґрунтовано фізичну та математичні моделі таких об'єктів контролю та управління. Показано, що коливально-імпульсний характер тренду зумовлений наявністю в технологічному процесі побічних локальних динамічних процесів консервативного типу синусоїдальної форми. Такі локальні динамічні процеси можуть з'єднуватися з технологічним об'єктом паралельно. При наявності двох окремих процесів з різними частотами та амплітудами створюються коливально-імпульсні рухи, котрі приводять до аналогічних відхилень трендів. Приводяться результати дослідження коливально-імпульсних трендів.

Ключові слова: тренд, коливання, імпульс, параметр, вимірювання, джерело, консервативність.

Вступ. Значна кількість трендів технологічних параметрів має коливально-імпульсний характер. Такий їх вигляд у більшості випадків зумовлений впливом на технологічний об'єкт контролю (ТОК) різних випадкових факторів, котрі створюють внутрішні джерела незагасаючих коливально-імпульсних процесів. Останні сприймаються відповідними первинними вимірювальними перетворювачами (давачами), наприклад, термопарами, манометрами, рівнемірами, аналізаторами речовин тощо. У комп'ютерних системах автоматизації (КСА) ці сигнали за відповідними алгоритмами обробляються, фільтруються та видаються на монітор реального часу в цифровій формі та у вигляді трендів. Як показують спостереження за роботою технологічного обладнання, причиною створення коливально-імпульсних трендів технологічних параметрів є наявність у ТОК джерел незагасаючих коливань

(ДНК) консервативного типу, котрі можуть з'єднуватися паралельно. Тривалі спостереження та результати оброки коливально-імпульсних трендів різних технологічних параметрів показали, що характер і форма трендів суттєво змінюється при змінах технологічного процесу, котрі виникають у результаті дії оператора КСА, а також при досягненні технологічними параметрами допустимих значень. Особливо значне відхилення спостерігається на трендах перед тим, коли появляються передаварійні ситуації. Таким чином можна стверджувати, що існує певний зв'язок з характером коливально-імпульсного тренду технологічного параметра та збійними ситуаціями, котрі виникають у технологічному процесі. До недавнього часу приймалося, що коливальний характер трендів технологічних параметрів зумовлений випадковими флуктуаціями, котрі формуються в ТОК, у результаті перетворення матеріальних речовин і при дії на них різних внутрішніх та зовнішніх факторів [1]. Для обробки таких трендів використовуються, як правило, статистичні методи, серед котрих характерним є метод заснований на картах Шухарта [2] для рекорельованих впливових параметрів і метод Хотелінга для багатопараметричних технологічних процесів при наявності кореляції її показників [3, 4]. У роботі [5] розглядається ідея, що тренди з коливально-імпульсним характером зміни технологічних параметрів є результатом дії внутрішніх та зовнішніх динамічних ланок, котрі існують або створюються в результаті порушень технологічного процесу. Але значна кількість питань, котрі виникають у результаті експлуатації технологічного обладнання, залишаються ще не виясненими та не вивченими. До таких питань відносяться коливально-імпульсні тренди вимірювальних параметрів, за котрими виконується оцінка якості вироблюваної продукції, а також причини появи систематичної похибки регулювання

навіть у тих випадках, коли регулятор системи автоматичного регулювання (САР) має інтегральну складову.

Метою статті є дослідження причин виникнення коливальних та імпульсних складових трендів вимірювальних параметрів, виявлення зв'язків між ними, характерні зміни трендів при роботі технологічного обладнання в динамічному режимі. Основними задачами роботи є наступні: розробка та обґрунтування фізичних моделей коливально-імпульсних трендів; математичне описання та розробка математичних моделей коливально-імпульсних трендів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Тренди основних технологічних параметрів записуються на екрані монітора реального часу та архівуються. На рис. 1 приведений реальний тренд рівня підігрівача живильної води низького тиску стадії підготовки пари для турбогенератора теплоелектростанції (ТЕС) за зміну при максимальному коефіцієнті перетворення каналу вимірювання та без фільтрації сигналу. Якщо номінальне значення рівня L_H стабілізується САР, то середнє значення рівня L_C повинно знаходитися близько до його номінального значення. З рис. 1 видно, що L_C (пунктирна біла лінія) на деяких ділянках тренду може суттєво відрізнитися від його нормованого значення.

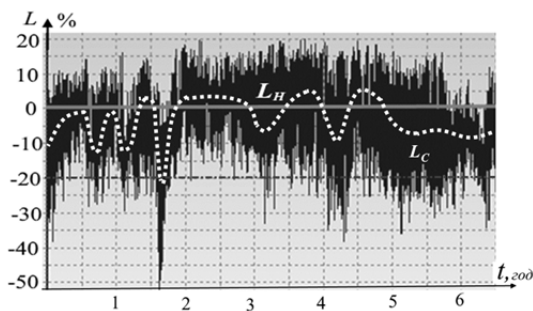


Рис. 1. Реальний тренду рівня живильної води в перегрівачі високого тиску без фільтрації сигналу

З рис. 1 видно, що відхилення $\Delta L = L_C - L_H$ тренду, по-перше, є значним; по-друге, достатньо нерівномірним (при збільшенні рівня максимальне відхилення ΔL складає 20%, а при зменшенні – до 50%); по-третє, виникають складності при визначенні середнього значення вимірюваного рівня, котре може бути як більшим, так і меншим від нормованого. У зв'язку з цим виникають проблеми, щодо якості управління таким технологічним процесом. З однієї сторони появляється систематична похибка вимірювання, котра приводить як до зменшення ефективності роботи ТОК, так і до погіршення роботи САР. З іншої сторони поява «уявної» систематичної похибки вимірювання приводить до підвищення ризику спрацювання технологічної сигналізації та системи протиаварійного захисту (наприклад, перехід тренду через штрих-пунктирну лінію). Якщо у першому випадку ця похибка погіршує оцінку роботи системи контролю технологічного пара-

метра, то у другому випадку вона приводить до відповідних матеріальних затрат, пов'язаних з невірною оцінкою стану об'єкта та спрацюванням систем аварійної сигналізації або в гіршому випадку – до включення систем протиаварійного захисту (ПАЗ). Для зменшення амплітуди коливань трендів, яка правило, використовують два шляхи: перший полягає в зменшенні коефіцієнта перетворення вимірювального каналу, а другий – у використанні фільтрів для роботи у широкій або у вузьких частотних смугах. Але ці методи мають відповідні недоліки, які не дозволяють значно покращити точність роботи систем сигналізації та ПАЗ. На рис. 2 показаний тренд того ж рівня при мінімальному коефіцієнті перетворення вимірювального каналу та використанні широкосмугового частотного фільтра.

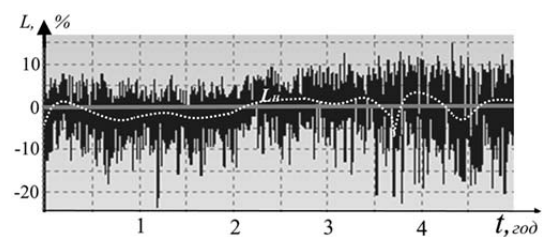


Рис. 2. Реальний тренду рівня живильної води з фільтрацією сигналу

З рис. 2 видно, що наявність широкосмугової фільтрації вимірювального сигналу значно покращує форму тренду (пунктирна лінія) і на перший погляд значно зменшує окремі імпульси. Але одночасно з тим погіршується точність контролю та спрацювання системи сигналізації та блокування. Дослідженнями встановлено, що при експлуатації ТОК, за рахунок дії зовнішніх і внутрішніх факторів, які впливають на перенесення матеріальних, теплових та інших потоків та гідродинамічних зусиль створюються локальні рухи, котрі впливають на технологічні параметри, за котрими оцінюється якість виготовленого продукту, ефективність роботи обладнання тощо. Кожний такий внутрішній рух, котрий є своєрідним ДНК, характеризується своєю амплітудою та частотою коливань. Приймаємо, що кожне таке ДНК є незалежним і з'єднанується з основним ТОК паралельно. Наприклад, для зміни рівня рідини такими ДНК може бути зміна тиску газу, гідростатичного тиску рідини, витрати матеріального потоку, гідростатичний опір, температура, та багато інших. Таким чином, прийmemo, що кожне ДНК створює ефект консервативної динамічної ланки, котра у першому наближенні описується таким диференціальним рівнянням

$$\tau_k^2 \frac{d^2 y_k(t)}{dt^2} + y_k(t) = k_k x_k, \quad (1)$$

де τ_k – стала часу; $y_k(t)$ – зміна вихідного параметра консервативної динамічної ланки за часом t ; k_k – коефіцієнт перетворення; x_k – вхідний параметр.

З [6] відомо, що рівняння типу (1) називається виродженим і має таке аналітичне рішення

$$y_k(t) = (k_k x_k) \sin(t/\tau_k), \quad (2)$$

Порівнюючи рівняння (1) і (2), бачимо, що $A_k = k_k x_k$ – амплітуда коливань; $\omega_k = 1/\tau_k$ – кутова частота власних коливань консервативної динамічної ланки.

Враховуючи сказане, рівняння (2) перетворюється на звичайне синусоїдальне рівняння

$$y_k(t) = A_k \sin(\omega_k t). \quad (3)$$

Виходячи з (3), можна стверджувати, що сторонні дії, котрі впливають на рух матеріального потоку в ТОУ, створюють джерела синусоїдальних коливань (ДСК) з відповідною амплітудою A_k та кутовою частотою ω_k . Приймаємо, що всі ДНК є автономними, а їх вихідні сигнали, створюють сумарний сигнал, який є вхідним впливом для ТОК. Нехай ТОК описується таким диференціальним рівнянням першого порядку

$$\tau_o \frac{dy_o(t)}{dt} + y_o(t) = k_o x_o, \quad (4)$$

де τ_o – стала часу об'єкта контролю; $y_o(t)$ – зміна вихідної координати ТОК (наприклад, рівень рідини в об'єкті) за час t ; k_o – коефіцієнт передачі об'єкта; x_o – вхідний параметр (наприклад, витрата матеріального потоку).

Рішення рівняння (4) має вигляд

$$y_o(t) = k_o x_o [1 - \exp(-t/\tau_o)]. \quad (5)$$

Для паралельного з'єднання ТОО та ДНК вихідний сигнал об'єкта визначається за формулою

$$y_\Sigma(t) = y_o(t) + y_k(t). \quad (6)$$

Підставивши (3) і (5) у рівняння (6), отримуємо математичну модель тренду в такому вигляді

$$y_\Sigma(t) = k_o x_o \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau_o}\right) \right] + A_k \sin(\omega_k t). \quad (7)$$

З рівняння (7) видно, що при дії на ТОК одного консервативного ДНК тренд вихідного вимірювального сигналу матиме коливальний вигляд з однаковою амплітудою $A_k = y_{max} - y_c = y_c - y_{min} = \text{const}$ і кутовою частотою $\omega_k = 1/T_k$, де T_k – період коливань. Крива перехідного процесу ТОК з одним ДНК приведена на рис. 2.

Вплив ДНК є характерним, в основному, для усталеного режиму роботи. Тому в подальшому розглядатимемо тільки тренд технологічного параметра для усталеного режиму роботи ТОК. Статичний режим роботи ТОК при дії на нього ДНК описується наступним рівнянням

$$y_\Sigma(t) = k_o x_o + \sum_{i=1}^n A_{ki} \sin(\omega_{ki} t), \quad (8)$$

де n – кількість ДНК, котрі паралельно діють на ТОК; A_{ki} – амплітуда i -го ДНК; ω_{ki} – кутова частота i -го ДНК.

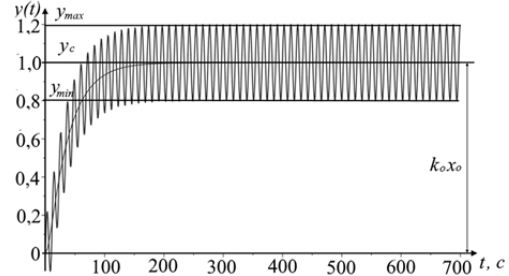


Рис. 3. Перехідний процес об'єкта управління з одним ДСК

З рівняння (8) видно, що в усталеному режимі роботи ДСК створює тільки синусоїдальні коливання з амплітудою A_{ki} і кутовою частотою ω_{ki} . У цьому випадку середнє значення вимірювального параметра $y_c(t)$ визначається за формулою $y_c(t) = 0,5(y_{max} - y_{min})$. Розглянемо вимірювальну систему ТОК з двома паралельно з'єднаними ДНК, кожна з котрих має свою амплітуду A_{k1} і A_{k2} та кутову частоту коливань ω_{k1} і ω_{k2} відповідно. Тоді математична модель такого ТОК набуває вигляду

$$y_\Sigma(t) = k_o x_o + A_{k1} \sin(\omega_{k1} t) \cdot \left[1 + \frac{A_{k2} \sin(\omega_{k2} t)}{A_{k1} \sin(\omega_{k1} t)} \right]. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що тренд вимірювального параметра ТОК матиме коливально-імпульсну форму за наявності множника

$$R_k(t) = \left[1 + \frac{A_{k2} \sin(\omega_{k2} t)}{A_{k1} \sin(\omega_{k1} t)} \right], \quad (10)$$

котрий є імпульсною функцією. Рівняння (10) перетворимо таким чином. Позначимо відношення амплітуд ДНК $n_k = A_{k2}/A_{k1}$, а відношення синусоїдальних функцій перетворимо таким чином. Нехай $\omega_{k2} = \omega_{k1} + \Delta\omega_k$. Тоді

$$\Delta\omega_k = \omega_{k1} \left(\frac{\omega_{k2}}{\omega_{k1}} - 1 \right) = \omega_{k1} (n - 1), \quad (11)$$

де $n = \omega_{k2}/\omega_{k1}$ – співвідношення кутових частот ДНК.

З врахуванням (11) відношення синусоїдальних функцій запишемо в такій формі

$$\frac{\sin(\omega_{k2} t)}{\sin(\omega_{k1} t)} = \frac{\sin[(\omega_{k1} + \Delta\omega_k) t]}{\sin(\omega_{k1} t)} = \cos(\Delta\omega_k t) [1 + \text{tg}(\omega_{k1} t) \text{tg}(\Delta\omega_k t)]. \quad (12)$$

Позначимо у рівнянні (12)

$$N_k(t) = 1 + tg(\omega_{k1}t)tg(\omega_{k1}(n-1)t). \quad (13)$$

З рівняння (13) видно, що резонансні ефекти створюються за рахунок добутку двох тангенціальних функцій. Графіки залежності $N_k(t) = f(t)$ для кутової частоти $\omega_{k1} = 0,75$ 1/с та різних співвідношень n і тривалості тренду $t = 175$ с приведені на рис. 4.

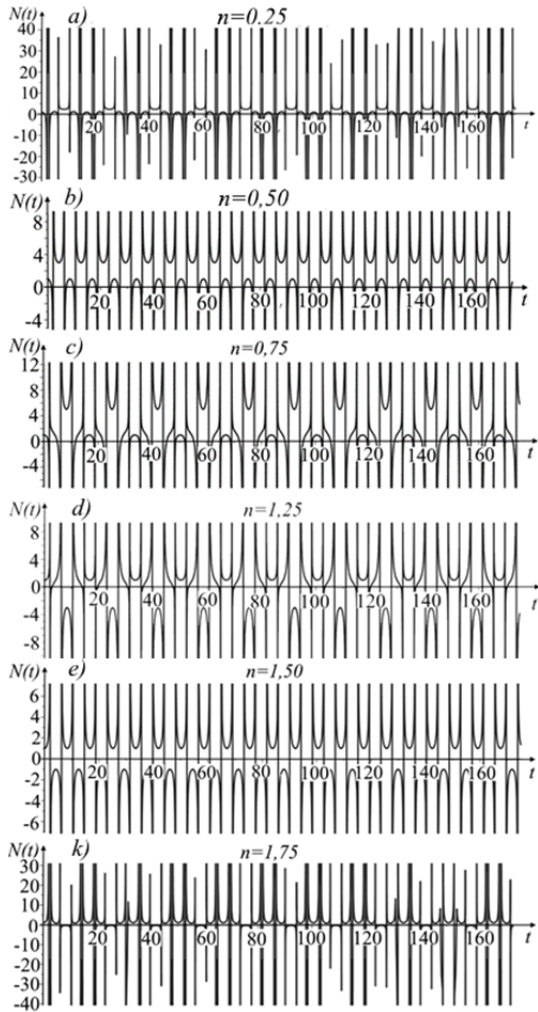


Рис. 4. Тренди функції $N_k(t) = f(t)$

Аналіз графіків $N_k(t) = f(t)$ показує, що в при паралельній дії двох консервативних динамічних ланок з різними частотами створюються умови, при котрих виникають резонансні ефекти. Теоретично доказано, що такі ефекти описуються добутком тангенціальних функцій, одна з котрих є залежною від коефіцієнта співвідношення частот цих динамічних ланок. Період появи резонансного ефекту є сталим. Якщо частоти двох консервативних ланок є рівними, то залежність $N_k(t) = f(t)$ являє собою пряму лінію, паралельну осі часу t .

Після відповідних перетворень рівняння (10) приводиться до наступного вигляду

$$R_k(t) = 1 + n_k N_k(t) \cos[\omega_{k1}(n-1)t]. \quad (13)$$

Так яка функція $N_k(t)$ є імпульсною, то залежність $R_k(t) = f(t)$ теж є імпульсною. Як видно з рис. 5, період імпульсів є таким же, як і для функції $N_k(t)$. Це свідчить про те, що косинусоїдальна функція впливає на період появи імпульсів. Окрім того зміна періоду імпульсів не залежить від співвідношення частот коливань ДНК.

Сумарний тренд технологічного параметра в статичному режимі роботи об'єкта контролю з врахуванням рівняння (13) приймає наступний вигляд

$$y(t) = k_0 x_0 + A_{k1} R_k(t) \sin(\omega_{k1}t). \quad (14)$$

На рис. 5 приведені тренди вимірювального технологічного параметра при дії на нього двох незалежних консервативних динамічних ланок з різними частотами. Коефіцієнт співвідношення частот такий же, як і в попередніх дослідженнях процесу створення одиничних імпульсів. Відміна полягає тільки в тому, що час запису тренду на екрані монітора реального часу збільшений практично до трьох разів з метою дослідити наявність імпульсів різної умовної висоти. Це дало можливість оцінити вплив основної частоти ДНК на ширину тренду та оцінити характер імпульсної його частини на середнє значення вимірювального параметра.

Аналіз трендів вимірювального параметра, приведених на рис. 5, показує, що зміна співвідношення частот ДСК значно впливає на характер тренду. Якщо відношення частот $w_2/w_1 = n < 1$, то від'ємна амплітуда імпульсів зростає, а при $n > 1$ відповідно збільшується. Якщо при $n = 1$ амплітуда синусоїдального дорівнює 2 (рис. 5, d), то відхилення цього співвідношення в ту чи іншу сторону приводить до значного збільшення амплітуди тренду. Темні коливальні лінії на трендах показують вплив на вимірювальний параметр основної частоти консервативної ланки (характеризується максимальною амплітудою). Відхилення цих ліній від нульового значення тренду є систематичною похибкою вимірювання. Зміна руху матеріальних чи теплових потоків завжди приводить до зміни звукового супроводу (принцип сопліки). Так як аварійні ситуації, як правило, створюють консервативні динамічні ланки та приводять до зміни власної частоти коливань, це приводить до зміни співвідношення частот. Такий ефект можна використати для визначення ризиків аварійних ситуацій технологічному обладнанні. На рис. 6 приведений тренд вимірювального параметра з розділенням його (пунктирні лінії) на зони ризику спрацювання систем протиаварійного захисту.

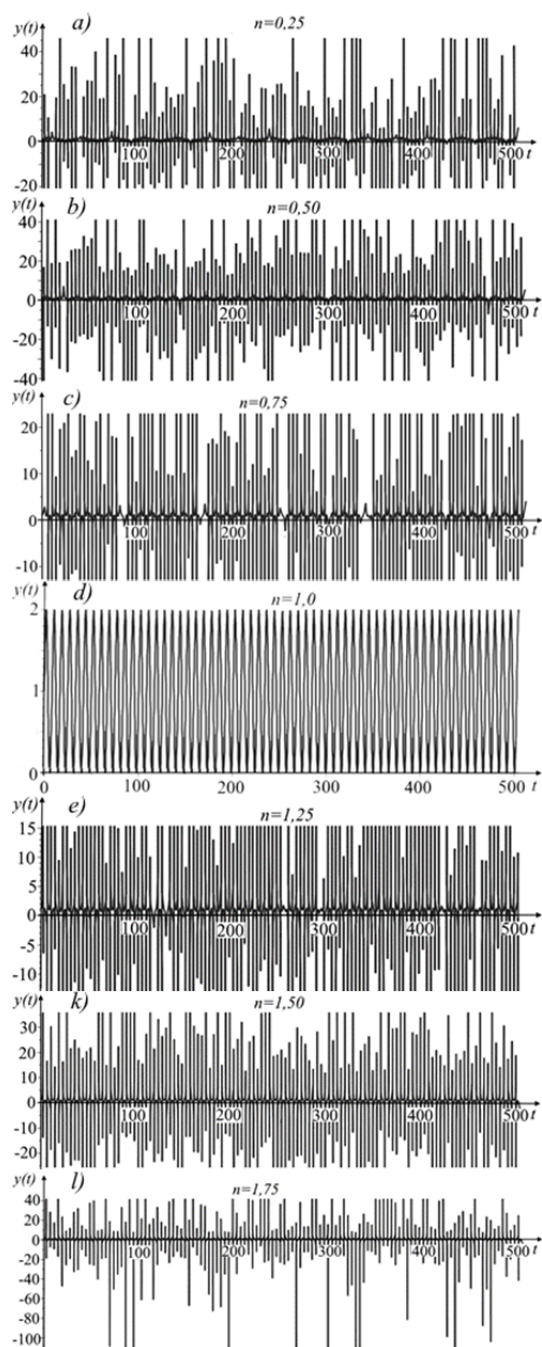


Рис. 5. Коливально-імпульсні тренди вимірювального параметра при різних співвідношеннях частот

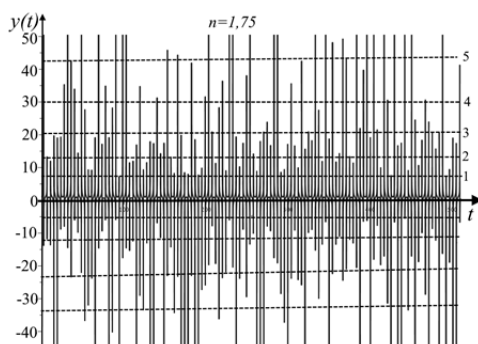


Рис. 6. Тренд вимірювального параметра при співвідношенні частот $n = 1.75$

Висновки. Тренди сучасних комп'ютерних систем автоматизації є основним технічним засобом, за котрим оцінюється якість виготовленого продукту, ефективність протікання технологічного процесу, а також точність спрацювання технологічної сигналізації та протиаварійних систем захисту. У багатьох випадках на трендах відображається поточне значення технологічного параметра у вигляді коливальних або коливально-імпульсних кривих з достатньо великим розкиданням максимального та мінімального їх значення. Вперше доказано, що коливально-імпульсний характер трендів зумовлений фізичними процесами, які протікають у технологічному об'єкті управління. У результаті цих дій виникають локальні консервативні динамічні процеси, котрі мають коливальний незагасаючий характер. Тому запропоновано такі локальні процеси представляти консервативними динамічними ланками та описувати їх виродженими диференціальними рівняннями другого порядку. Показано, що при одночасній паралельній дії на вимірювальний параметр двох локальних консервативних дій з різними частотами тренд такого параметра має коливально-імпульсний характер. Приводяться результати досліджень таких коливально-імпульсних систем вимірювання. Установлено, що період появи імпульсів визначається частотою коливаний основного локального процесу. Доказано, що практична висота амплітуди імпульсів, яка відображається на коливально-імпульсних трендах, залежить від співвідношення частот двох локальних консервативних джерел незагасаючих коливаний. Показано, що коливально-імпульсні тренди можна використати для визначення ризиків критичних значень параметрів, за котрими виконується спрацювання систем протиаварійного захисту.

Література

1. Пістун С., Матіко Ф., Роман В., Стеценко А. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання. [Текст] /С. Пістун, Ф. Матіко., В. Роман., А. Стеценко. Метрологія та прилади. № 4. – 2014. – С. 13-23.
2. Клячкин В. Н. Многомерный статистический контроль технологического процесса. [Текст] / В. Н. Клячкин – М.: Финансы и статистика. 2003. – 192 с.
3. Montgomery D. C. (2009) Introduction to Statistical Quality Control, 6th Ed. – John Wiley & Sons. 734 P.
4. Володарский Е., Кошечая Л., Добролюбова М. Оценка качества многопараметрического технологического процесса при корреляции его показателей. [Текст] / Е. Володарский, Л. Кошечая, М. Добролюбова. Метрологія та прилади. № 5. – 2017. – С. 20-24.
5. Стенцель Й. І., Літвінов К. А. Математичні моделі консервативних об'єктів контролю. [Текст] /Й. І. Стенцель, К. А. Літвінов. Метрологія та прилади. № 1. – 2020. – С. 30-36.

6. Бронштейн И. Н. и Семендяев К. А. Справочник по математике. [Текст] / И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев. – М.: Изд-во «Наука». – 1964. – 608 с.

References

1. Pistun YE., Matiko F., Roman V., Stetsenko A. Doslidzhennya pokhybky ul'trazvukovykh vytratimiriv za umov spotvorenoyi struktury potoku na osnovi CFD modelyuvannya. [Tekst] /YE. Pistun, F. Matiko., V. Roman., A. Stetsenko. Metrolohiya ta prylady. № 4. – 2014. – S. 13 23.
2. Klyachkyn V. N. Mnohomernyy statystycheskyy kontrol' tekhnolohycheskoho protsessa. [Tekst] / V. N. Klyachkyn – M.: Fynansy y statystyka. 2003. – 192 s.
3. Montgomery D. C. (2009) Introduction to Statistical Quality Control, 6th Ed. – John Wiley & Sons. 734 P.
4. Volodarskyy E., Koshevaya L., Dobrolyubova M. Otsenyvanye kachestva mnohoparametrycheskoho tekhnolohycheskoho protsessa pry korrelyatsyy eho pokazatelye. [Tekst] / E. Volodarskyy, L. Koshevaya, M. Dobrolyubova. Metrolohiya ta prylady. № 5. – 2017. – S. 20 24.
5. Stentsel' Y. I., Litvinov K. A. Matematychni modeli konservatyvnykh ob'yektiv kontrolyu. [Tekst] /Y. I. Stentsel', K. A. Litvinov. Metrolohiya ta prylady. № 1. – 2020. – S. 30 36.
6. Bronshteyn Y. N. y Semendyaev K. A. Spravochnyk po matematyke. [Tekst] / Y. N. Bronshteyn y K. A. Semendyaev. – M.: Yzd vo «Nauka». – 1964. – 608 s.

Стенцель И. И., Грановский Э. А., Степанов В. С. Исследования колебательно-импульсных трендов измерительных параметров

Значительное количество трендов технологических параметров имеют колебательно-импульсный характер с достаточно великим разбросом показателей по амплитуде. Это приводит к ложному определению измерительного параметра. Принималось, что колебательно-импульсный тренд является причиной воздействия случайных факторов. Предложено и обосновано физическую и математические модели таких объектов контроля и управления. Показано, что колебательно-импульсный характер тренда обусловлен наличием в технологическом процессе побочных локальных динамических процессов консервативного типа синусоидальной формы. Такие локальные динамические процессы могут соединяться с технологическим объектом параллельно. При наличии двух отдельных локальных процессов с разными частотами и амплитудами создаются колебательно-импульсные движения, которые приводят к аналогичным отклонениям амплитуды тренда. Приведены результаты исследований таких колебательно-импульсных трендов.

Ключевые слова: тренд, колебания, импульс, параметр, измерение, источник, консервативность.

Stencel J.I, Granovsky E.O., Stepanov V.S. Investigation of oscillating pulse trends of measuring parameters

A significant number of trends in technological parameters have an oscillatory impulse character. The amplitude of such fluctuations has a fairly large spread, which can reach 20 percent or more of the measurement range. This leads to incorrect determination of the measurement parameter. Until now, it was assumed that the oscillatory impulse trend contains only random periodic oscillations with a certain amplitude and frequency. In addition, it was assumed that oscillatory impulse trends are the cause of the influence of random factors. The results of processing real technological trends have shown that their impulses are of a resonant nature. Physical and mathematical models of such objects of control and management are proposed and substantiated. It is shown that the vibrational-impulse character of the trends in the measuring parameters is the result of the creation of local dynamic processes of the conservative type in the technological object of monitoring and control. There can be many such processes in an object, they can be independent and affect the measured technological parameter simultaneously. The outputs of such local conservative dynamic links can be summed. It is shown that in the presence of two separate local processes with different frequencies and amplitudes, oscillatory impulse movements are created in the technological object. In addition, these movements lead to resonance effects, and hence to the appearance of impulses on trends. The period of appearance of pulses and their height is determined by the frequency of oscillations of conservative processes and the ratio of their frequencies. The spread of the trend amplitude depends on the amplitude of oscillations of conservative processes and the height of the resonant pulses. The results of studies of vibration-impulse trends of technological parameters with two parallel conservative links are presented. It is shown that when their natural frequencies are equal, the trend has a sinusoidal shape. It is indicated that oscillatory impulse trends lead not only to the appearance of a systematic measurement error, but also to a disruption in the operation of automatic control systems. In addition, the appearance of such an error leads to an increase in the risk of triggering a process alarm and emergency protection systems for process equipment.

Keywords: trend, fluctuations, momentum, parameter, measurement, source, conservatism.

Стенцель Йосип Іванович – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.

Email: jospstencil81@gmail.com

Грановський Едуард Олексійович – канд. техн. наук, Генеральний директор наукового центру вивчення ризиків «Rizikon», м. Северодонецьк, Україна.

Степанов Владислав Сергійович – студент магістратури, заступник директора НВП «Rizikon» м. Северодонецьк.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-84-88>

УДК 629.4.015:656.2.08

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЛАТФОРМ НА ВІЗКАХ З ЦЕНТРАЛЬНИМ І БУКСОВИМ ПІДВІШУВАННЯМ

Дьомін Ю.В., Дьомін Р.Ю., Черняк Г.Ю., Ноженко В.С.

DETERMINATION OF INDICATORS OF VERTICAL DYNAMICS OF CONTAINER PLATFORMS ON BOGIES WITH CENTRAL AND AXLE-BOX SUSPENSION

Domin Yu.V., Domin R.Yu., Cherniak G.Yu., Nozhenko V.S.

В статті представлено математичні моделі, що описують вертикальні коливання платформ для перевезення крупногабаритних контейнерів. Розглянуто два варіанти обладнання платформ ходовими частинами: візками з центральним ресорним підвішуванням моделі 18-100 і візками з буксовим підвішуванням типу Y25. За результатами розрахунків виконаних за допомогою системи Mathcad здійснено порівняння основних динамічних показників досліджуваних об'єктів, а саме сил взаємодії колісних пар і колії, прискорення кузовів та коефіцієнтів динаміки. З аналізу результатів комп'ютерного моделювання встановлено значні переваги платформи на візках типу Y25 з точки зору збереженості колії та віброзахисту вантажу. З метою організації швидкісних контейнерних перевезень рекомендовано оснащення спеціалізованих вагонів-платформ візками з суцільними рамами і буксовим ресорним підвішуванням.

Ключові слова: спеціалізовані вагони-платформи, комп'ютерне моделювання, показники вертикальної динаміки.

Вступ. Як неодноразово підкреслювалось в авторських публікаціях, конкурентоспроможність контейнерних перевезень залежить від суттєвого підвищення швидкісних характеристик спеціалізованих вагонів [1-3]. Підвищення швидкості руху пасажирських поїздів в умовах частково суміщеного руху на виділених лініях потребує вирішення наступного завдання – підвищення швидкості руху поїздів комбінованого транспорту. Потрібно зауважити, що як би не була добре підготовлена колія для швидкісного руху, пропуск нею поїздів складених з вантажних вагонів існуючого парку неминує буде призводити до погіршення її технічного стану. Справа у тому, що візки вантажних вагонів моделі 18-100, розроблені за проектами 30-тих років минулого століття і запущені у серійне виробництво з 1956 року, створюють підвищену динамічну дію на колію і стали фактично головною причиною

прискореного розладу колії. Незадовільні динамічні властивості цих візків головним чином пояснюються їх конструкційними особливостями й технічним станом [4, 5]. Тому для підвищення швидкості руху вантажних поїздів на лініях, призначених переважно для пасажирських перевезень, необхідні вагонні візки «дружні» до колії, тобто з мінімальним впливом на колійну структуру. У зв'язку з цим заслуговують уваги результати досліджень динаміки вагонів, обладнаних візками типу Y25 [6-9].

Разом з тим освоєння наукоємних конструкцій вантажних вагонів та прогресивних технологій їх експлуатації досі залишається поза пріоритетами залізничної галузі. Так зване оновлення вагонного парку пов'язане з виробництвом вантажних вагонів за старотипними проектами та частковою модернізацією існуючого рухомого складу. Таке положення призвело до значних втрат залізницями контейнеропридатних вантажів, що відійшли на автомобільний транспорт.

Виходячи з об'єктивної необхідності розвитку швидкісних контейнерних та контейнерних перевезень постає науково-технічна проблема розробки технічних рішень щодо створення візків принципово нових конструкцій. Пропоновані технічні рішення мають обґрунтовуватись результатами комплексних досліджень динаміки руху вантажних вагонів з акцентом на досягнення показників силової дії на колію на рівні однойменних показників пасажирських вагонів.

Мета статті полягає у оцінюванні за результатами комп'ютерного моделювання показників силової взаємодії з колією вагонів-платформ завантажених контейнерами у випадках оснащення їх триелементними візками з центральним ресорним підвішуванням і візками з суцільними рамами, що спираються на буксове підвішування.

Виклад основного матеріалу дослідження. У якості об'єктів дослідження вибрано вагон-платформа моделі 13-7024 з двома варіантами обладнання ходовими частинами, а саме візками моделі 18-100 і візками, які за конструкцією подібні до візків типу Y25. Відповідні розрахункові схеми для визначення показників вертикальної динаміки досліджуваних об'єктів наведено на рис. 1 і 2. На цих рисунках позначено: k_T – жорсткість ресорного підвішування візка; F_{TP} – сила тертя в ресорному підвішуванні; k_1 і β_1 – жорсткість і коефіцієнт демпфірування колії; $\eta_i(x)$ – функції, якими описуються нерівності колії.

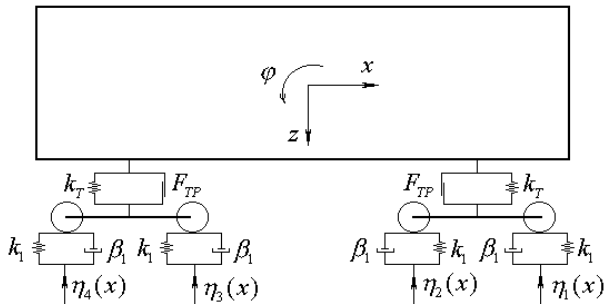


Рис. 1. Розрахункова схема платформи на візках моделі 18-100

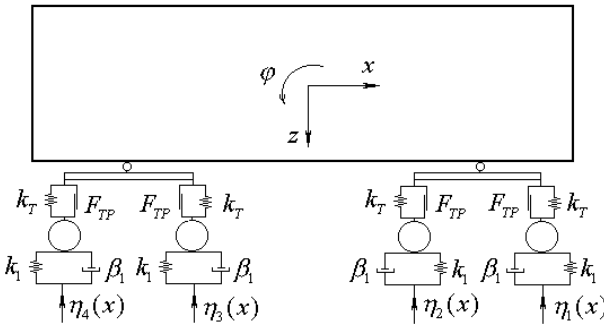


Рис. 2. Розрахункова схема платформи на візках типу Y25

Конфігурації механічних систем, що розглядаються за схемами 1 і 2, описують наступні величини: поступальні переміщення центрів мас кузова x і частин візків x_i ($i = 1, 2$ – для схеми 1, $i = 1, 2, 3, 4$ – для схеми 2) уздовж осі колії; вертикальні переміщення центрів мас кузова z і частин візків z_i ; кути повороту кузова φ і рам візків φ_i відносно їхніх головних центральних осей, перпендикулярних поздовжній площині симетрії вагона. Оскільки координата x є циклічною, узагальнені координати систем обрано таким чином:

- для схеми 1 – $q_1 = z, q_2 = \varphi, q_3 = z_1, q_4 = \varphi_1, q_5 = z_2, q_6 = \varphi_2$;
- для схеми 2 – $q_1 = z, q_2 = \varphi, q_3 = \varphi_1, q_4 = \varphi_2, q_5 = z_1, q_6 = z_2, q_7 = z_3, q_8 = z_4$.

Нерівність рейкової колії описується періодичною функцією

$$\eta(t) = \frac{d}{2}(1 - \cos \omega t), \quad (1)$$

де d – глибина нерівності; ω – частота, яка визначається за формулою $\omega = 2\pi v/L$ (L – довжина нерівності, v – швидкість руху).

Рівняння коливань платформ у вертикальній площині отримано як рівняння Лагранжа II роду, які зазвичай використовується при вирішенні задач динаміки рухомого складу [10]. Вертикальні коливання платформи на візках моделі 18-100 описуються наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= c_{1,1} \cdot q_1 + c_{1,3} \cdot q_3 + c_{1,5} \cdot q_5 + Q_1 \\ \ddot{q}_2 &= c_{2,2} \cdot q_2 + c_{2,3} \cdot q_3 + c_{2,5} \cdot q_5 + Q_2 \\ \ddot{q}_3 &= c_{3,1} \cdot q_1 + c_{3,2} \cdot q_2 + c_{3,3} \cdot q_3 + b_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + Q_3 + \\ &+ \frac{k_1}{M_3} \cdot (\eta_1 + \eta_2) + \frac{\beta_1}{M_3} \cdot (\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) \\ \ddot{q}_4 &= c_{4,4} \cdot q_4 + b_{4,4} \cdot \dot{q}_4 - \frac{k_1 \cdot a}{M_4} \cdot (\eta_1 - \eta_2) + \\ &- \frac{\beta_1 \cdot a}{M_4} \cdot (\dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2) \\ \ddot{q}_5 &= c_{5,1} \cdot q_1 + c_{5,2} \cdot q_2 + c_{5,5} \cdot q_5 + b_{5,5} \cdot \dot{q}_5 + Q_5 + \\ &+ \frac{k_1}{M_5} \cdot (\eta_3 + \eta_4) + \frac{\beta_1}{M_5} \cdot (\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) \\ \ddot{q}_6 &= c_{6,6} \cdot q_6 + b_{6,6} \cdot \dot{q}_6 - \frac{k_1 \cdot a}{M_6} \cdot (\eta_3 - \eta_4) + \\ &- \frac{\beta_1 \cdot a}{M_6} \cdot (\dot{\eta}_3 - \dot{\eta}_4) \end{aligned} \quad (2)$$

У рівняннях (2) позначено: c_{ij} – квазіпружні коефіцієнти, які залежать від параметрів жорсткості ресорного підвішування [10]; Q_i – узагальнені сили; M_i – величини, що дорівнюють інерційним параметрам, тобто масі кузова і його моменту інерції.

Узагальнені сили, що входять у праві частини диференціальних рівнянь, визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\frac{F_{TP}}{M_1} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_3) + \\ &+ \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_5)] \\ Q_2 &= \frac{F_{TP} \cdot l}{M_2} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_3) + \\ &- \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_5)] \\ Q_3 &= \frac{F_{TP}}{M_3} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_3) \\ Q_5 &= \frac{F_{TP}}{M_5} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - \dot{q}_5) \end{aligned}$$

де l – половина бази платформи.

Система диференціальних рівнянь, що описує вертикальні коливання платформи на візках типу Y25, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= c_{1,1} \cdot q_1 + c_{1,5} \cdot q_5 + c_{1,6} \cdot q_6 + c_{1,7} \cdot q_7 + \\ &+ c_{1,8} \cdot q_8 + Q_1 \\ \ddot{q}_2 &= c_{2,2} \cdot q_2 + c_{2,3} \cdot q_3 + c_{2,4} \cdot q_4 + c_{2,5} \cdot q_5 + Q_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{q}_3 &= c_{3,2} \cdot q_2 + c_{3,3} \cdot q_3 + c_{3,5} \cdot q_5 + c_{3,6} \cdot q_6 + Q_3 \\
 \ddot{q}_4 &= c_{4,2} \cdot q_2 + c_{4,4} \cdot q_4 + c_{4,7} \cdot q_7 + c_{4,8} \cdot q_8 + Q_4 \\
 \ddot{q}_5 &= c_{5,1} \cdot q_1 + c_{5,2} \cdot q_2 + c_{5,3} \cdot q_3 + c_{5,5} \cdot q_5 + \\
 &+ b_{5,5} \cdot \dot{q}_5 + Q_5 + \frac{k_1}{M_5} \cdot \eta_1 + \frac{\beta_1}{M_5} \cdot \dot{\eta}_1 \\
 \ddot{q}_6 &= c_{6,1} \cdot q_1 + c_{6,2} \cdot q_2 + c_{6,3} \cdot q_3 + c_{6,6} \cdot q_6 + \\
 &+ b_{6,6} \cdot \dot{q}_6 + Q_6 + \frac{k_1}{M_6} \cdot \eta_2 + \frac{\beta_1}{M_6} \cdot \dot{\eta}_2 \\
 \ddot{q}_7 &= c_{7,1} \cdot q_1 + c_{7,2} \cdot q_2 + c_{7,4} \cdot q_4 + c_{7,7} \cdot q_7 + \\
 &+ b_{7,7} \cdot \dot{q}_7 + Q_7 + \frac{k_1}{M_7} \cdot \eta_3 + \frac{\beta_1}{M_7} \cdot \dot{\eta}_3 \\
 \ddot{q}_8 &= c_{8,1} \cdot q_1 + c_{8,2} \cdot q_2 + c_{8,4} \cdot q_4 + c_{8,8} \cdot q_8 + \\
 &+ b_{8,8} \cdot \dot{q}_8 + Q_8 + \frac{k_1}{M_8} \cdot \eta_4 + \frac{\beta_1}{M_8} \cdot \dot{\eta}_4.
 \end{aligned} \quad (3)$$

У рівняннях (3) узагальнені сили визначаються за наступними виразами:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= -\frac{F_{TP}}{M_1} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_5) + \\
 &+ \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_6) + \\
 &+ \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_7) + \\
 &+ \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_8)] \\
 Q_2 &= \frac{F_{TP} \cdot l}{M_2} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_5) + \\
 &+ \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_6) + \\
 &- \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_7) + \\
 &- \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_8)] \\
 Q_3 &= \frac{F_{TP} \cdot a}{M_3} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_5) + \\
 &- \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_6)] \\
 Q_4 &= \frac{F_{TP} \cdot a}{M_4} \cdot [\text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_7) + \\
 &- \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_8)] \\
 Q_5 &= \frac{F_{TP}}{M_5} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_5) \\
 Q_6 &= \frac{F_{TP}}{M_6} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_3 - \dot{q}_6) \\
 Q_7 &= \frac{F_{TP}}{M_5} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 - a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_7) \\
 Q_8 &= \frac{F_{TP}}{M_8} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 + l \cdot \dot{q}_2 + a \cdot \dot{q}_4 - \dot{q}_8)
 \end{aligned}$$

де a – половина бази візка.

Розв'язок диференціальних рівнянь (2) і (3) одержано інтегруванням за методом Рунге-Кутта з фіксованим кроком за допомогою системи Mathcad. За результатами розрахунків отримано показники вертикальної динаміки платформ завантажених контейнерами. У якості основних показників розглянуто сили взаємодії колісних пар і колії, прискорення кузовів платформ, коефіцієнти вертикальної динаміки. На рис. 3, 4 і 5 представлені графіки залежностей згаданих динамічних показників від швидкості руху платформ.

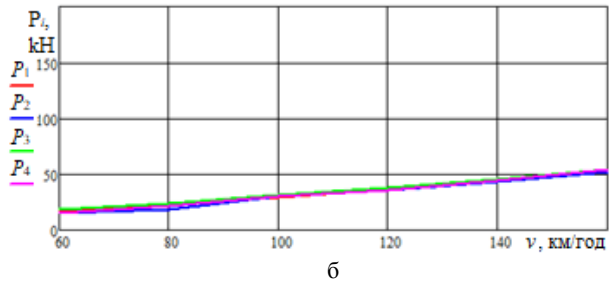
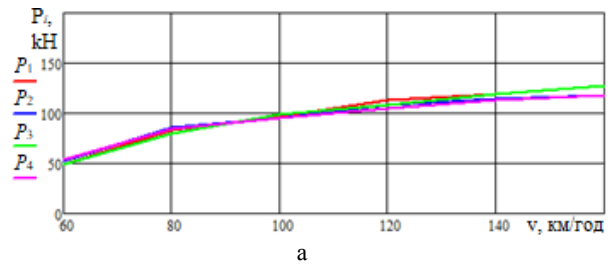


Рис. 3. Сили взаємодії колісних пар з колією:
а – платформа на візках моделі 18-100,
б – платформа на візках типу Y25

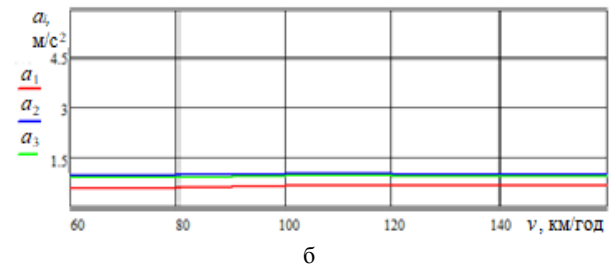
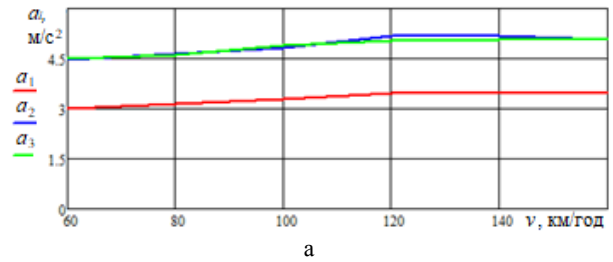


Рис. 4. Прискорення кузова: а – платформа на візках моделі 18-100, б – платформа на візках типу Y25

Як видно з результатів розрахунків, максимальні значення динамічних показників платформи на візках типу Y25 суттєво нижчі ніж платформи на візках моделі 18-100. Так, рівень силової дії на колію платформи на візках моделі 18-100 при заявленій конструкційній швидкості 120 км/год у 3 рази перевищує максимальні сили взаємодії з колією платформи на візках типу Y25. Порівняння на цій же швидкості руху прискорень кузова і коефіцієнтів динаміки дає відповідні співвідношення 5,2 і 3,1. В цілому для розглянутого діапазону швидкості руху мінімальні співвідношення отриманих розрахункових значень відповідних динамічних показників становлять: за силами взаємодії – 2,3 (при $v = 160$ км/год); за прискореннями – 4,5 (при $v = 60$ км/год); за кое-

фіцієнтами динаміки – 2,8 (при $v = 160$ км/год). Отже за проведеною розрахунковою оцінкою динамічні якості платформи на візках типу Y25 значно перевищують динамічні якості платформи на візках моделі 18-100, зокрема, за такими важливими показниками, які характеризують силовий вплив на колії і захист вантажів, чутливих до вібрації.

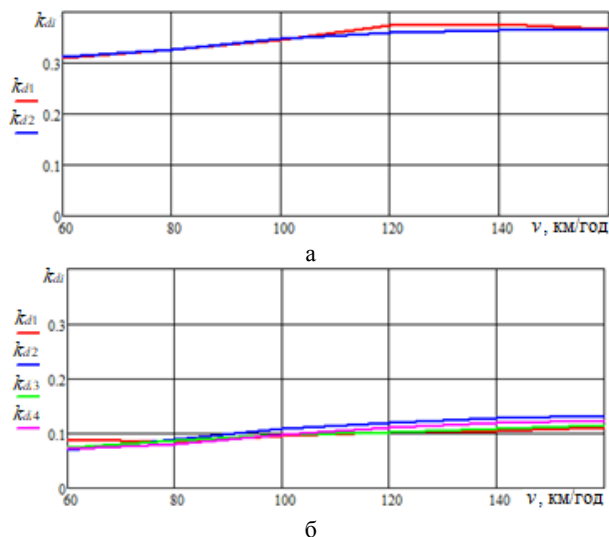


Рис. 5. Коефіцієнти динаміки: а – платформа на візках моделі 18-100, б – платформа на візках типу Y25

Висновки. За результатами комп'ютерного моделювання вертикальної динаміки контейнерних платформ у завантаженому стані на візках з центральним підвішуванням і на візках з буксовим підвішуванням визначено вирішальні показники динамічних якостей, а саме сили взаємодії колісних пар і колії, прискорення кузовів та коефіцієнти динаміки. З аналізу отриманих розрахункових даних визначено, що за показниками вертикальної динаміки платформа на візках з буксовим підвішуванням має значні переваги у порівнянні з платформою на візках з центральним підвішуванням, а саме у забезпеченні збереженості колійної інфраструктури і вантажів чутливих до вібрацій. Для організації швидкісних контейнерних перевезень рекомендовано оснащення спеціалізованих вагонів-платформ візками з суцільними рамами і буксовим ресорним підвішуванням. За досвідом європейських залізниць застосування таких візків сприятиме впровадженню «зеленого» тарифу, що дозволить підвищити конкурентоспроможність залізниць на ринку транспортних послуг, зокрема в секторі комбінованих перевезень.

Література

1. Кірпа Г.М. Технічне забезпечення контейнерних перевезень міжнародними коридорами України / Г.М. Кірпа, Ю.В. Дьомін // Залізничний транспорт України. – 1997. – №1. – С. 28-32.
2. Дьомін Ю.В. Железнодорожная техника комбинированного транспорта / Ю.В. Дьомін // Залізничний транспорт України. – 2011. – №6. – С. 9-12.

3. Дьомін Ю.В. Оцінка динамічних показників безпеки руху вагонів для швидкісних контейнерних перевезень / Ю.В. Дьомін, Р.Ю. Дьомін, Г.Ю. Черняк // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології». – 2019. – Вип. 33. Т. 2. – С. 111-120.
4. Галиев И. И. Конкурентоспособность российских железных дорог, ее связь с динамическими свойствами ходовой части грузового вагона и способы их улучшения / И.И. Галиев, В.А. Нехаев, А.А. Николаев // Техника железных дорог. – 2011. – № 3 (15). – С. 46-54.
5. Iwnicki S. Dynamics of railway freight vehicles / S. Iwnicki, S. Stichel, A. Orlova, M. Hecht // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2015. – Vol. 53(7). – P. 1-39.
6. Molatefi H. Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon / H. Molatefi, M. Hecht, M.H. Kadivar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2006. – 220(347). – P. 347-359.
7. Šťastniak P. Strength Investigation of Main Frame in New "Track friendly" Railway Bogie / P. Šťastniak, M. Moravčík, L. Smetanka, P. Baran // Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 18, No. 2. – P. 315-320.
8. Benini C. The influence of suspension components friction on race car vertical dynamics / C. Benini, M. Gadola, D. Chindamo, S. Uberti, F. Marchesin, R. Barbosa // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2017. – Vol. 55(3). – P. 338-350.
9. Malcolm C. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio / C. Malcolm // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility – 2016. – №54(5). – P. 568-584.
10. Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів: Навчальний посібник / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк // К: КУЕТТ, 2003. – 270 с.

References

1. Kirpa G.M. Tekhnichne zabezpechennya konteynernykh perevezen' mizhnarodnymy korydoramy Ukrainy [Technical support of piggyback transport by international corridors of Ukraine] / G.M. Kirpa, Yu.V. Domin // Zaliznychnyy transport Ukrainy. – 1997. – №1. – S. 28-32.
2. Domin Yu.V. Zheleznodorozhnaya tekhnika kombinirovannogo transporta [Railway equipment of combined transport] / Yu.V. Domin // Zaliznychnyy transport Ukrainy. – 2011. – №6. – S. 9-12.
3. Domin Yu.V. Otsinka dynamichnykh pokaznykh bezpeky rukhu vagoniv dlya shvydkisnykh konteynernykh perevezen' [Estimation of dynamic indicators of safety of movement of cars for high-speed container transportations] / Yu.V. Domin, R.Yu. Domin, G.Yu. Cherniak // Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi». – 2019. – Vyp. 33. Т. 2. – С. 111-120.
4. Galiyev I.I. Konkurentosposobnost' rossiyskikh zheleznykh dorog, yeye svyaz' s dinamicheskimi svoystvami khodovoy chasti gruzovogo vagona i sposoby ikh uluchsheniya [Competitiveness of Russian railways, its relationship with the dynamic properties of the running gears of a freight car and ways to improve them] / I.I. Galiyev, V.A. Nekhayev, A.A. Nikolayev // Tekhnika zheleznykh dorog. – 2011. – № 3 (15). – S. 46-54.
5. Molatefi H. Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon / H. Molatefi, M. Hecht, M.H. Kadivar

- // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2006. – 220(347). – P. 347-359.
6. Šťastniak P. Strength Investigation of Main Frame in New "Track friendly" Railway Bogie / P. Šťastniak, M. Moravčík, L. Smetanka, P. Baran // Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 18, No. 2. – P. 315-320.
 7. Benini C. The influence of suspension components friction on race car vertical dynamics / C. Benini, M. Gadola, D. Chindamo, S. Uberti, F. Marchesin, R. Barbosa // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2017. – Vol. 55(3). – P. 338-350.
 8. Malcolm C. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio / C. Malcolm // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility – 2016. – №54(5). – P. 568-584.
 9. Domin Yu.V. Osnovy dynamiki vagoniv: Navchal'nyy posibnyk [Fundamentals of car dynamics: Textbook] / Yu.V. Domin, G.Yu. Chernyak // K: KUETT, 2003. – 270 s.

Дёмин Ю.В., Дёмин Р.Ю., Черняк А.Ю., Ноженко В.С. Определение показателей вертикальной динамики контейнерных платформ на тележках с центральным и буксовым подвешиванием

В статье представлены математические модели, описывающие вертикальные колебания платформ для перевозки крупногабаритных контейнеров. Рассмотрены два варианта оборудования платформ ходовыми частями: тележками с центральным рессорным подвешиванием модели 18-100 и тележками с буксовым подвешиванием типа Y25. По результатам расчетов выполненных с помощью системы Mathcad проведено сравнение основных динамических показателей исследуемых объектов, а именно сил взаимодействия колесных пар и пути, ускорений кузовов и коэффициентов динамики. Из анализа результатов компьютерного моделирования установлены значительные преимущества платформы на тележках типа Y25 с точки зрения сохранности пути и виброзащиты груза. С целью организации скоростных контейнерных перевозок рекомендуется оснащение специализированных вагонов-платформ тележками с цельными рамами и буксовым рессорным подвешиванием.

Ключевые слова: специализированные вагоны-платформы, компьютерное моделирование, показатели вертикальной динамики.

Domin Yu., Domin R., Cherniak G., Nozhenko V. Determination of indicators of vertical dynamics of container platforms on bogies with central and axle-box suspension

The article presents the results of research on the vertical dynamics of platforms for the transportation of large containers in the loaded state on three-piece bogies with central suspension and on bogies with solid frames and axle suspension. Systems of differential equations describing the oscillations of platforms in the vertical plane when moving on a track with periodic irregularities are obtained as a Lagrange equa-

tion of the second kind. Based on the results of calculations performed using the Mathcad system, a comparison of the main dynamic parameters of the studied objects, namely the forces of interaction of wheelsets and track, body acceleration and dynamics coefficients. The speed range of platforms motion from 60 km/h to 160 km/h is considered. From the analysis of the obtained calculated data it is determined that according to the indicators of vertical dynamics the platform on bogies with axle suspension has significant advantages in comparison with the platform on bogies with central suspension. Thus, the level of force on the track of the platform on the bogies of the model 18-100 at the stated design speed of 120 km/h is 3 times higher than the maximum forces of interaction with the track of the platform on the bogies type Y25. Comparison at the same speed of body accelerations and coefficients of dynamics gives the corresponding ratios of 5.2 and 3.1. In general, for the considered range of speed of movement the minimum ratios of the received settlement values of the corresponding dynamic indicators make: on forces of interaction – 2.3 (at a speed of 160 km/h); for accelerations – 4.5 (at a speed of 60 km/h); according to the coefficients of dynamics – 2.8 (at a speed of 160 km/h). Based on the obtained research results, it is recommended to equip specialized platform cars for high-speed container transportation with bogies with solid frames and axle spring suspension, which will help ensure the safety of track infrastructure and cargo sensitive to vibration. According to the experience of European railways, the use of such bogies will contribute to the introduction of a "green" tariff, which will increase the competitiveness of railways in the market of transport services, in particular in the combined transport sector.

Key words: specialized platform cars, computer modeling, vertical dynamics indicators.

Дьомін Юрій Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля E-mail: domin1520.1435mm@gmail.com

Дьомін Ростислав Юрійович – доктор технічних наук, перший заступник директора Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту E-mail: r.domin@1520mm.com

Черняк Ганна Юрійвна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля E-mail: anchernyak1520mm@gmail.com

Ноженко Володимир Сергійович – кандидат технічних наук, проректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля E-mail: v.nozhenko@1520mm.com

Стаття подана 11.10.2020.

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 7 (263) 2020**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск Лорія М.Г.

Оригінал-макет Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 10.12.2020 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,5. Обл.-вид. арк. 11,9.
Наклад 50 прим. Вид. № 3294. Заказ № 35(2020). Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний 59-А
м. Северодонецьк, 93400, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com

Надруковано:
Відділ технічного обслуговування СНУ ім. В. Даля
Адреса: просп. Центральний, 59-а
м. Северодонецьк, 93400