

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ЛОРІЯ МАРИНА ГЕННАДІЇВНА

УДК 681.5.015

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ВИРОБНИЦТВОМ МЕТАНОЛУ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Сєверодонецьк – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України (м. Сєвєродонецьк).

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Поркуян Ольга Вікторівна,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, ректор (м. Сєвєродонецьк).

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Михальов Олександр Ілліч,
Національна металургійна академія України Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри інформаційних технологій та систем (м. Дніпро).

доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри інформатики та комп'ютерної техніки (м. Харків).

доктор технічних наук, професор
Купін Андрій Іванович,
Криворізький національний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж (м. Кривий Ріг).

Захист відбудеться «21» вересня 2019 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 29.051.13 Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля Міністерства освіти і науки України за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус № 7, аудиторія № 534.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 93400, Луганська обл., м. Сєвєродонецьк, вул. Донецька, 43.

Автореферат розісланий 17.08.2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук

В.С. Кардашук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні актуальною науково-технічною проблемою є безперервне вдосконалення існуючих технологічних схем основних хімічних виробництв, зокрема багатотоннажних, таких як виробництва метанолу, аміаку, нітратної кислоти тощо. Зростання вартості сировини на світових ринках спричиняє стрімке зростання собівартості продукції українських виробництв. Суттєва зміна кон'юнктури ринку, що призвела до зміни вартості сировини, робочої сили тощо, зробила більшість виробництв, що побудовано у 60–90-их роках минулого століття, нерентабельними. У цих умовах на перший план виходять роботи щодо модернізації існуючих виробництв. Ураховуючи, що можливості конструкторів і проектувальників пов'язаних зі структурною оптимізацією класичних схем майже вичерпані, особливу увагу слід приділити саме параметричній оптимізації.

Ведення технологічного процесу в умовах екстремальних значень основних параметрів процесу, наприклад, концентрації цільового компонента на виході колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, дозволяє суттєво зменшити собівартість продукції, що виробляється. Складність підтримання екстремального режиму полягає в тому, що значення екстремуму залежить від великої кількості впливаючих параметрів: навантаження, склад сировини тощо, які постійно змінюються. Для врахування цих впливів на положення екстремуму слід розробити математичну модель об'єкта керування. Ця модель має бути водночас достатньо точною і простою. Використовуючи математичні моделі, можна покращити не тільки статичні параметри процесу, а й динамічні.

На більшості хімічних підприємств проведено технічну модернізацію, зокрема і систем керування. Але, як виявляється, і цього може бути недостатньо, якщо на самому нижньому рівні системи керування основний пристрій у системах автоматичного регулювання – регулятор, який формує керуючий сигнал з метою отримання необхідної точності і якості перехідного процесу, неоптимально налаштований. Як показує аналіз літературних джерел, частка неоптимально налаштованих регуляторів, що використовуються в промисловості, сягає 50%. Отже іншим перспективним напрямом вдосконалення існуючих технологічних схем є покращення динамічних характеристик систем автоматичного регулювання. Вирішити цю проблему можна також шляхом розв'язання оптимізаційної задачі, використавши детерміновану або експериментально-статистичну математичну модель.

Із наведеного вище можна зробити висновок, що розроблення методологічних засад використання математичних моделей для оптимізації статичних і динамічних параметрів процесів виробництва метанолу є актуальною науковою проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами наукових досліджень кафедр

комп'ютерно-інтегрованих систем керування та електронних апаратів Східно-українського національного університету імені Володимира Даля в межах науково-дослідних проектів «Оптимальне настроювання регулятора за квадратичною оптимізаційною функцією» (№ ДР 0112U008267) та «Розробка системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу у виробництві метанолу» 0114U000644. Крім того, протягом 2009–2018 виконувалися науково-дослідні роботи, дипломні та магістерські роботи за цією тематикою. У цих дослідженнях здобувач брав безпосередню участь як керівник і відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва метанолу шляхом створення систем оптимального керування з моделлю, які забезпечують максимальне використання виробничого резерву виробництва метанолу.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- проведення технологічного аудиту виробництва метанолу як складної динамічної системи, який передбачає дослідження технологічної схеми виробництва з метою визначення скритого виробничого резерву виробництва метанолу та визначення способів його реалізації;
- вивчення, аналіз та випробування експериментально способів апроксимації перехідних характеристик об'єктів керування ланками 2–4 порядків;
- обґрунтування способів вибору початкових даних для апроксимації кривих перехідного процесу через характерні точки та порівняльний аналіз запропонованого способу з рівномірним розподілом точок за віссю часу;
- визначення особливостей використання квадратичної оптимізаційної функції при апроксимації рівнянням перехідної характеристики ланки 2-го порядку через характерні точки кривої перехідного процесу для пошуку оптимальних настроювань ПД-регулятора у виробництві метанолу;
- проведення порівняльного аналізу ефективності запропонованого методу пошуку оптимальних настроювань ПД-регуляторів з найбільш поширеними інженерними методами;
- розроблення комбінованих статичних та динамічних математичних моделей колони синтезу метанолу;
- розроблення алгоритму функціонування та створення системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу у виробництві метанолу та дослідження її роботи на комп'ютерних імітаторах;
- розроблення статичних та динамічних математичних моделей апаратів повітряного охолодження вузла охолодження та конденсації метанолу, що враховують коефіцієнт забрудненості поверхонь теплообміну;
- розроблення алгоритмів керування та створення системи керування вузлом охолодження та конденсації з моделлю, дослідження її роботи на комп'ютерних імітаторах та обґрунтування економічної доцільності.

Об'єкт дослідження – основні технологічні процеси стадії синтезу у виробництві метанолу.

Предмет дослідження – математичні моделі та системи автоматичного керування технологічними об'єктами стадії синтезу у виробництві метанолу.

Науково-практична проблема – створення систем оптимального керування з моделлю стадією синтезу метанолу у виробництві метанолу, які дозволять підвищити ефективність виробництва метанолу.

Методи дослідження. Дослідження систем автоматичного керування об'єктами керування та настроювань ПІД-регуляторів проводилися теоретично з використанням ЕОМ та експериментально. Розв'язання оптимізаційної задачі пошуку оптимальних настроювань регуляторів, що забезпечує мінімум динамічної похибки проводилося методом градієнтного спуску. Використано теорію математичного моделювання і теорію оптимального керування для розроблення та дослідження математичних моделей об'єктів керування та для пошуку оптимальних настроювань регулятора; з використанням методів математичної статистики при обробці результатів експериментальних досліджень. Для пошуку екстремуму оптимізаційної функції та для визначення коефіцієнтів моделі при апроксимації використано метод найменших квадратів. Під час практичного уточнення екстремального значення концентрації цільового компонента на виході колони синтезу метанолу використано метод Хука-Дживса. Дослідження математичних моделей та систем автоматичного регулювання об'єктів керування у виробництві метанолу проводилися з використанням сучасних програмних продуктів: SCADA-системи TRACE MODE 6.08, Maple 17, MS Excel 2013, MathCAD 15.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі запропоновано методологічні засади застосування математичних моделей технологічних об'єктів виробництва метанолу для побудови системи оптимального керування.

Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати досліджень:

- запропоновано нову методологію створення комбінованих математичних моделей, що дозволило визначити пріоритети їхнього використання для розв'язання задач оптимізації технологічних процесів через удосконалення роботи систем автоматичного регулювання та запропонувати сучасну класифікацію моделей;

- вперше проведено ідентифікацію кривих розгону еквівалентних об'єктів керування перехідною характеристикою ланки 2–4 порядку через характерні точки, які визначаються як екстремуми похідних кривої розгону об'єкту керування, що дозволило зменшити похибку апроксимації до 2% порівняно з апроксимацією рівномірним розподілом точок;

- дістало подальшого розвитку використання квадратичної оптимізаційної функції для отримання оптимальних настроювань ПІД-регулятора, шляхом використання ідентифікованих через характерні точки математичних моделей ек-

вівалентних об'єктів керування, що покращило динамічні показники систем автоматичного регулювання;

– вдосконалено метод пошуку глобального екстремуму полімодальної функції шляхом визначення початкових координат експериментального пошуку екстремуму як координат екстремуму запропонованої оптимізаційної функції, що дало можливість зменшити кількість кроків до досягнення глобального екстремуму;

– вперше розроблено комбіновану математичну модель багатополічної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, яка має порядок не більше 4-го, що дозволило легко знаходити зворотну модель та визначати значення поточних витрат синтез-газу по холодних байпасах колони для досягнення максимальної концентрації цільового компонента на виході колони;

– вперше запропоновано систему керування з моделлю багатополічної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, яка включає блок адаптації математичної моделі колони, що дозволило підтримувати адекватність математичної моделі в широкому діапазоні зміни параметрів;

– вперше для керування послідовно з'єднаними повітряними теплообмінниками, запропоновано систему дискретного керування з моделлю, яка враховує динамічну зміну коефіцієнту забруднення поверхні, що дало змогу зменшити споживання електроенергії на 9,8% та без застосування додаткових засобів аналогового регулювання на дискретних елементах забезпечити плавність регулювання;

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність результатів досліджень полягає у тому, що в роботі розроблено методику створення математичних моделей, спосіб знаходження оптимальних налаштувань ПД-регулятора, систему оптимального керування колоною синтезу метанолу з моделлю та дискретну систему керування стадією охолодження та конденсації метанолу з моделлю.

Розроблений спосіб знаходження оптимальних налаштувань ПД-регулятора може бути застосований і при знаходженні оптимальних налаштувань ПД-регулятора для інших систем автоматичного регулювання, об'єкти керування в яких можна ідентифікувати ланкою 2-го порядку із запізненням.

Розроблено алгоритм роботи та створено систему керування блоком повітряного охолодження та конденсації у виробництві метанолу, що враховує прогноз погоди, зміну навантаження тощо.

Теоретичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих систем керування Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля в рамках спеціалізації «Автоматизація технологічних процесів» під час викладання дисциплін: «Методи сучасної теорії керування», «Проектування та монтаж автоматизованих систем керування».

Отримані наукові результати дисертаційної роботи впроваджено на ТОВ «Хімтехнологія», НВП «ІНТЕКО», а також у навчальний процес, що підтверджується відповідними актами.

Результати теоретичних досліджень і експериментальних випробувань на базі НВП «ІНТЕКО» і ТОВ «Хімтехнологія» (м. Сєверодонецьк) створили підстави для формулювання висновку про економічну ефективність запропонованої методології, адже розроблення методики створення математичних моделей, способу знаходження оптимальних настроювань ПД-регулятора, системи оптимального керування колоною синтезу метанолу з моделлю та дискретної системи керування стадією охолодження та конденсації метанолу з моделлю дозволить збільшити обсяг метанолу, що виробляється, до 10% та зменшити його собівартість до 5%.

Корисність і новизна роботи підтверджена п'ятьма патентами на корисну модель, міжнародним патентом на винахід та трьома актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, що містяться в дисертації, отримані автором самостійно. Критичний аналіз літературних джерел, теоретичні та експериментальні дослідження виконано особисто, а розробки впроваджено за безпосередньої участі автора.

Внесок автора під час отримання наукових результатів, викладених у дисертації, полягає у критичному аналізі літератури за темою роботи, в розробленні методів використання математичних моделей для оптимізації статичних і динамічних параметрів існуючого виробництва метанолу, в написанні наукових статей, а також особистих доповідей на конференціях і семінарах. Усі експериментальні та розрахункові роботи автор виконував особисто. Постановка завдань досліджень здійснювалася спільно з науковими консультантом – д.т.н., проф. О. В. Поркуян. У обговоренні результатів брали також участь д.т.н проф. Й. І.Стенцель; д.т.н., доц. О. Б. Целіщев; к.т.н., доц. П. Й. Єлісеєв. Усі дані систематизовано й проаналізовано особисто автором.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 8] – реалізація алгоритму розрахунку оптимальних настроювань регуляторів і аналіз результатів досліджень; [6] – розробка алгоритму, що дозволяє за кривою розгону об'єкта керування визначити коефіцієнт передачі та постійні часу ланки 2-го порядку; [9] – розробка алгоритму ідентифікації об'єкту керування з використанням рівномірного розподілу точок на кривій розгону еквівалентного об'єкту керування, ланкою другого порядку з часом запізнення та визначення залежності похибки ідентифікації від кількості обраних точок на кривій розгону еквівалентного об'єкту керування; [18, 22] – розроблення алгоритму ідентифікації об'єкту керування з використанням характерних точок ланкою 2-го порядку з часом запізнення та визначення залежності похибки ідентифікації від кількості характерних точок; [13] – аналіз найбільш поширених інженерних методів пошуку настроювань регуляторів, опис алгоритму способу знаходження

оптимальних настроювань регуляторів; [5, 29] – порівняльний аналіз алгоритму пошуку оптимальних настроювань регулятора на основі інтегральної квадратичної оптимізаційної функції з іншими методами; [10] – розробка системи екстремального керування багатополічним реактором з моделлю; [11, 19] – розробка динамічної моделі газового реактора; в [14, 20] – розробка комбінованої моделі для завдань оптимізації; в [12, 16] – адаптація математичної моделі реактора синтезу метанолу; в [15, 21, 30] – оптимізація параметрів колони синтезу метанолу; [7] – дослідження впливу вузла охолодження і конденсації на роботу циклу синтезу метанолу; у [23] – запропоновано систему оптимального керування вузлом охолодження і конденсації у виробництві метанолу; [2, 3, 4] – аналіз та дослідження способів отримання метанолу; [24, 25, 28] – дослідження нових шляхів отримання метанолу; [26, 27] – розроблення математичної моделі та формування висновків; [24, 25, 28] – участь у постановці проблеми, у розрахунках, у розробленні реакційних апаратів і технологічних схем, у виконанні експериментів і аналізі результатів експериментів; [17] – участь у розробленні системи моніторингу та в написанні статті; [31–38] – участь у розробленні способів і в оформленні патентів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й окремі результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах, а саме: «З'їзд екологів» (Вінниця, 2006, 2009, 2011, 2013); Конгрес екологів (Одеса, 2007); «Сучасні проблеми фізичної хімії» (Донецьк, 2009, 2013), МНТК «Технологія» (Сєверодонецьк, 2006–2019), «Стратегія якості у промисловості та освіті» (Варна, 2010–2013), «Advanced Materials Research» (Китай, 2013); «Сучасна фізична хімія» (Росія, Туапсе 2012, 2013); «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і стабільний розвиток» (Київ, 2010); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми хіммотології; Міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалювання систем автоматизації технологічних процесів» (м. Мінськ, 2010 р.); Перша Інтернет-конференція «Регіональні інформаційні й керуючі системи» (м. Сєверодонецьк, 2010 р.); регіональна науково-практична конференція «Майбутній науковець», 2010–2012», Перша всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» (м. Сєверодонецьк, 2011 р.); Інтернет-конференція «Інформаційні й керуючі системи в промисловості, економіці й екології» (м. Сєверодонецьк, 2011-2012 р.), XI міжнародна науково-технічна конференція «ВОТТІ-11-2012» (м. Хмельницький, 2012), XI Міжнародна конференція «Контроль і керування в складних системах (ККС-2012)» (м. Вінниця), «Міжрегіональні проблеми екологічної безпеки» (Одеса, 2007), Теорія і практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів» (Київ, 2017).

За результатами роботи було зроблено доповідь в Інституті проблем нафтохімії НАН Азербайджану (м. Баку).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 57 публікаціях, у тому числі: 1 колективна монографія [1], 30 наукових статей у фахових виданнях, з яких 6 одноосібних [18, 19, 20, 21, 22, 29] та 6 у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз [24–30], 19 тез доповідей на українських і міжнародних конференціях і симпозіумах [37–55], 5 патентів України на корисну модель [31, 33–36], 1 закордонний патент на винахід [32].

Обсяг й структура дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 358 сторінках, складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 10-ти додатків. Обсяг основного тексту дисертації становить 293 сторінок. Роботу ілюстровано 12 таблицями та 94 рисунками. Список використаних джерел містить 373 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано вибір і актуальність теми дисертаційної роботи, висвітлено сучасний стан проблеми, сформульовано мету й завдання дослідження, сформульовано наукову новизну й практичну цінність роботи, визначено предмет та об'єкт дослідження, висвітлено внесок автора у публікації за темою.

Перший розділ. Наведено аналіз виробництва метанолу, проведено технічний аудит стадії синтезу метанолу, визначено резерв виробництва метанолу, проаналізовано існуючі на виробництві системи автоматичного керування, проаналізовано способи оптимізації статичних та динамічних характеристик систем керування, наведено сучасну класифікацію математичних моделей технологічних об'єктів.

Виробництво метанолу характеризується великою кількістю апаратів, споживаної енергії і сировинних ресурсів. Проведення технологічного аудиту показало, що колона синтезу метанолу є апаратом, який містить основний виробничий резерв щодо збільшення продуктивності агрегату синтезу метанолу. Найліпшим рішенням у цьому випадку є застосування системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу. Це дозволить вести виробничий процес синтезу метанолу в оптимальних умовах, тим самим задіявши промисловий резерв. Аналіз даних, наданих підприємством, показав, що при змінах складу або витрати синтез-газу відбувається зміна температурного режиму колони синтезу. У результаті цього, враховуючи циклічну організацію роботи стадії синтезу метанолу, змінюються технологічні параметри майже у всіх апаратах стадії.

Детально розглянуто стадію синтезу метанолу, вузол охолодження та конденсації. Схематично цикл синтезу виробництва метанолу наведено на рис. 1. Колона синтезу метанолу являє собою складний об'єкт керування, що характеризується великою кількістю внутрішніх зв'язків. На діючому виробництві метанолу температури на полицях колони синтезу виставляються оператором-технологом вручну. Такий підхід не може забезпечити оптимальну роботу колони синтезу при зміні навантаження на агрегат, зміну складу синтез-газу та зміну властивостей каталізатора тощо.

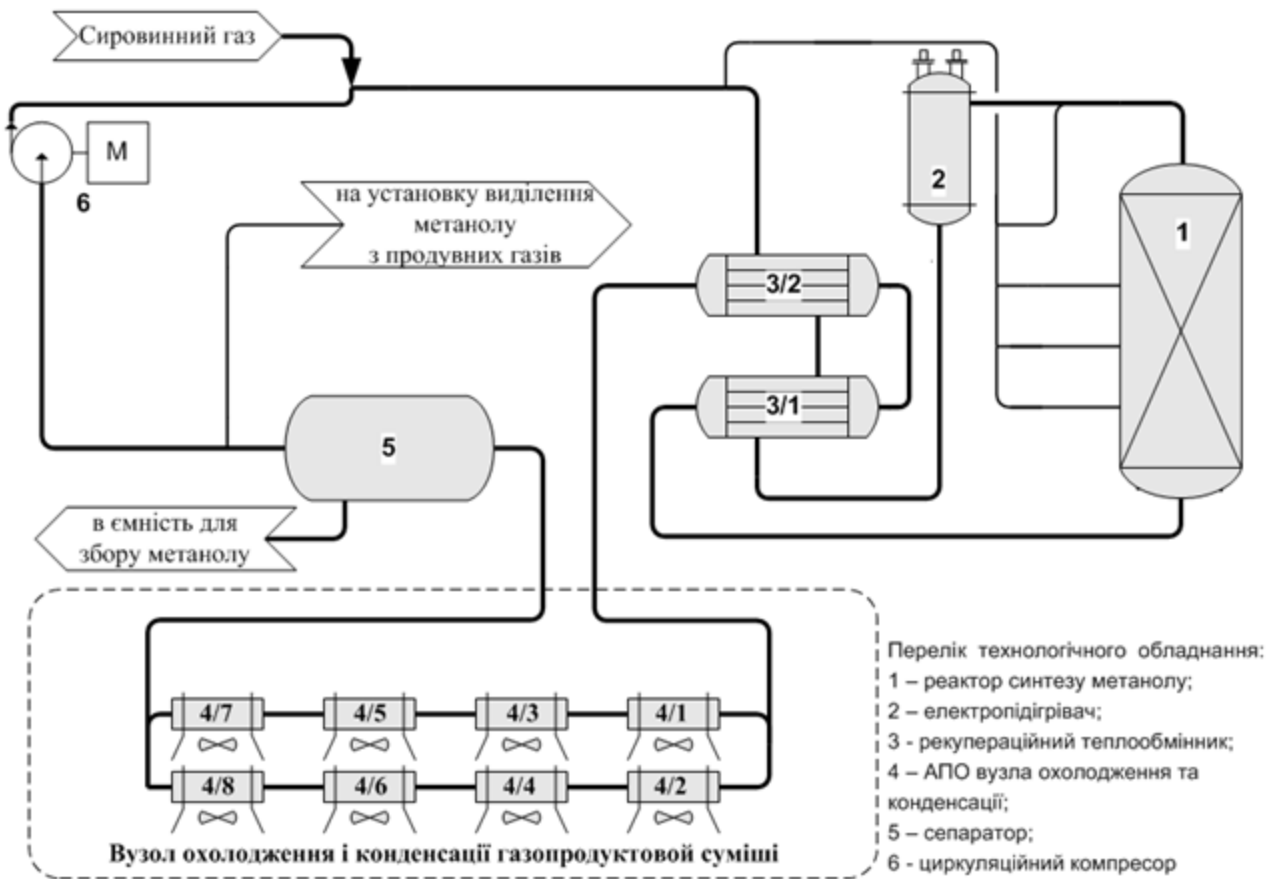


Рис. 1. Спрощена технологічна схема циклу синтезу метанолу

У роботі наведено аналіз впливу неузгодженої роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стабільність виробничого процесу синтезу метанолу. Вузол охолодження і конденсації складається з восьми холодильників-конденсаторів з повітряним охолодженням. Холодильники розділені на дві групи, що з'єднані між собою паралельно. У кожній групі чотири послідовно з'єднаних апарата. Температурний режим конденсації парів метанолу регулюється зміною кількості працюючих апаратів повітряного охолодження. Щоб уникнути температурного розбалансу паралельних потоків газопродуктової суміші апарати повітряного охолодження вмикають або вимикають попарно. При низьких температурах навколишнього повітря частина вентиляторів виводиться у резерв. Для підвищення ефективності роботи вузла в літній час передбачено систему зрошення теплообмінників оборотною водою. Увімкнення та вимкнення вентиляторів, а також системи зрошення, здійснюється оперативним персоналом.

Керування роботою вузла охолодження і конденсації в «ручному» режимі призводить до неузгодженої роботи повітряних холодильників і є однією з причин нестабільної роботи всього циклу синтезу метанолу.

Критичний аналіз виробництва метанолу на ПрАТ «Севродонецьке об'єднання «АЗОТ» та інших виробництв дозволив виявити технологічний резерв виробництва та шляхи його використання. Резервом виробництва метанолу є:

- можливість збільшити концентрацію метанолу на виході колони синтезу метанолу шляхом підтримання оптимального профілю температур по висоті колони через перерозподіл синтез-газу за фізичними каналами колони синтезу метанолу;

- здійснення узгодженої роботи апаратів повітряного охолодження стадії охолодження та конденсації метанолу, що дозволить запобігти «ривкам» зміни тиску на вході компресора синтез-газу та, відповідно, розбалансу колони синтезу та всього агрегату;

- покращення динамічних характеристик систем автоматичного керування виробництва метанолу шляхом пошуку оптимальних настроювань промислових регуляторів.

Пов'язує ці три напрями оптимізації виробництва метанолу необхідність отримання простих та водночас адекватних математичних моделей.

Крім того, розглянуто основні поняття і положення методів оптимізації хіміко-технологічних процесів, а також надано їх характеристики. Аналіз сучасного стану системи керування виробництвом метанолу показав, що вона є не оптимальною. Серед усіх можливих рішень показано, що саме використання системи керування з моделлю дозволить максимально використати наявний промисловий резерв виробництва метанолу.

Наведено критичний огляд сучасних методів моделювання технологічних об'єктів, роль і місце моделей та моделювання, класифікацію моделей, підходи до розробки моделей. Наведено аналіз можливості застосування різноманітних видів математичних моделей для розв'язання задач оптимізації технологічних процесів хімічної промисловості. Показано для розв'язання яких задач доцільно використовувати саме детерміновані математичні моделі, а для яких – експериментально-статистичні.

Аналіз одного з ключових питань синтезу систем автоматичного керування, а саме розроблення математичних моделей об'єктів керування для пошуку оптимальних настроювань ПД-регуляторів показав, що найтипівіший об'єкт вже має 3–4 порядок рівняння детермінованої моделі. Для отримання моделі еквівалентного об'єкта керування до цієї моделі ще слід додати рівняння математичних моделей виконавчого пристрою, регулюючого органу, датчика, нормуючого перетворювача. Таким чином, модель еквівалентного об'єкта керування сягає 8–10 порядку. Використання моделей таких порядків робить неможливим застосування аналітичних методів для розв'язання оптимізаційної задачі. Унаслідок цього використовуються наближені методи розв'язання. Це врешті призводить до втрати точності розробленої моделі та може призвести навіть до втрати її адекватності. Отже використання детермінованих математичних моделей в цьому випадку є недоцільним. Оптимальність системи керування залежить від оптимальної роботи систем автоматичного регулювання, яка своєю чергою залежить від настроювань ПД-регуляторів. На сьогодні відомо багато теоретичних та експериментальних методів пошуку настроювань ПД-

регулятора. Однак універсального методу, який дозволив би визначити оптимальні налаштування ПІД-регулятора для систем та об'єктів різного типу не існує. Як наслідок, більшість промислових регуляторів настроєні не оптимально. Для вирішення цієї проблеми слід використовувати експериментально-теоретичні методи пошуку оптимальних налаштувань ПІД-регулятора із використанням математичної моделі об'єкта керування. За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дослідження.

Другий розділ присвячено пасивній ідентифікації в розімкненому контурі; способу вибору початкових даних для алгоритму ідентифікації об'єкта керування з використанням характерних точок ланкою другого порядку з часом запізнення; визначенню залежності похибок ідентифікації від обраних характерних точок та їхньої кількості; порівняльному аналізу способів вибору початкових даних для алгоритму ідентифікації об'єкта керування: рівномірним розподілом точок на кривій розгону та за характерними точками. Для отримання математичної моделі об'єкта керування (рис. 2, а), як початкові дані обирається крива розгону еквівалентного об'єкта керування (рис. 3), яка отримується при пасивній ідентифікації в розімкненому контурі експериментальним шляхом на об'єкті керування. Криву розгону ЕОК можна отримати також теоретичним шляхом. Для цього слід отримати його передаточну функцію та за допомогою зворотного перетворення Лапласа отримати рівняння перехідної характеристики.

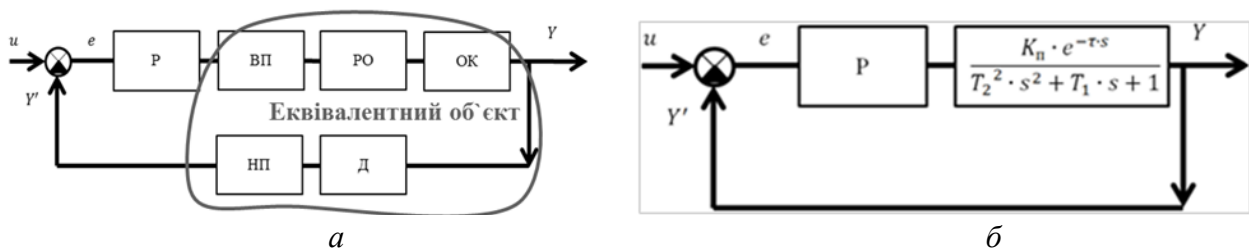


Рис. 2. Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання:

а – вихідна; б – перетворена;

(Р – регулятор; ВП – виконавчий пристрій; РО – регулюючий орган;

ОК – об'єкт керування; Д – датчик; НП – нормуючий перетворювач)

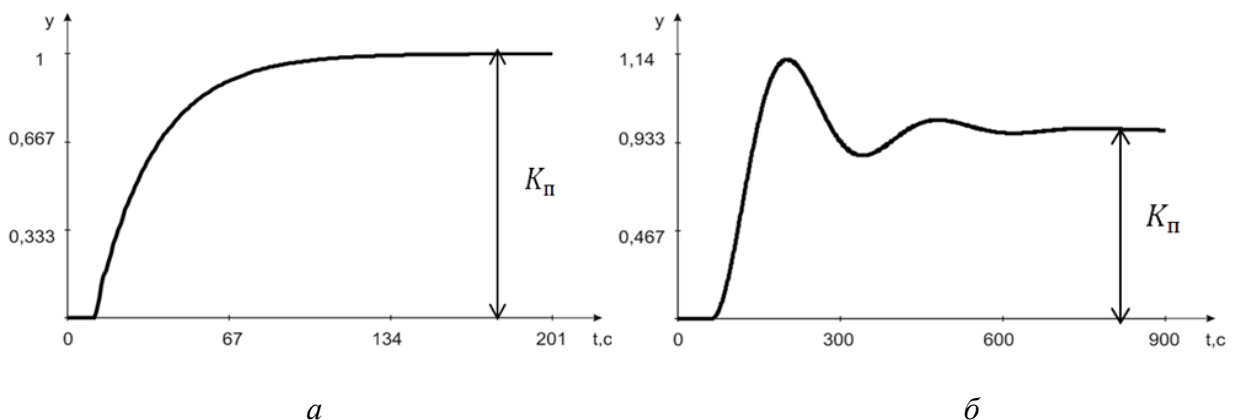


Рис. 3. Криві розгону еквівалентного об'єкта керування:

а – аперіодичного процесу; б – коливального процесу

Тобто, якщо за кривою розгону апроксимувати еквівалентний об'єкт керування ланкою 2-го порядку з часом запізнення, то структурну схему одноконтурної системи автоматичного регулювання можна навести так як показано на рис. 2 б.

Залежно від характеру перехідного процесу (рис. 3), рівняння його перехідної функції матиме вигляд:
для аперіодичного процесу

$$y(t) = H(t - \tau) \cdot K_{II} \cdot u \cdot \left[1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot e^{-\alpha_1(t-\tau)} + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot e^{-\alpha_2(t-\tau)} \right], \quad (1)$$

де $\alpha_{1,2}$ – корені диференціального рівняння; $H(t - \tau)$ – функція Хевісайда; τ – час запізнення; K_{II} – коефіцієнт передачі; u – вхідний сигнал (наприклад, ступінчасте збурення); y – вихідний сигнал;

для коливального процесу

$$y(t) = H(t - \tau) \cdot K_{II} \cdot u \cdot \left[1 - e^{-\alpha_1(t-\tau)} \cdot \left(\cos(\omega \cdot (t - \tau)) + \frac{\alpha}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot (t - \tau)) \right) \right], \quad (2)$$

де α – ступінь загасання перехідного процесу; ω – власна частота коливань системи.

Запропоновано алгоритм ідентифікації параметрів рівняння ланки 2-го порядку з часом запізнення, яким апроксимується експериментальна крива розгону еквівалентного об'єкта керування з урахуванням її нелінійності. У рівняннях (1) і (2) є чотири невідомих параметра. Коефіцієнт K_{II} знаходиться за кривою розгону (рис. 3). Для того щоб знайти останні три параметри (для аперіодичного процесу це α_1 , α_2 і τ , а для коливального – α , ω і τ) слід використати нелінійний метод найменших квадратів. Далі знайдені значення невідомих параметрів слід підставити у відповідне рівняння (1) або (2), для отримання рівняння перехідної функції. Потім розраховується передаточна функція, використовуючи пряме перетворення за Лапласом отриманого рівняння.

Наведено новий спосіб визначення початкових даних для алгоритму ідентифікації об'єкта керування – за характерними точками. Проведено порівняльний аналіз запропонованого способу зі способом, коли точки розташовуються рівномірно на кривій розгону.

При апроксимації перехідного процесу виникає питання скільки точок необхідно взяти і яким чином вони мають бути розподілені. Розв'язуючи подібного типу задач, зазвичай використовують рівномірний розподіл точок на апроксимованій характеристиці. Даний спосіб визначення початкових даних для апроксимації дозволяє рівномірно наблизити апроксимовану криву до експериментальної практично рівномірно у всіх обраних точках.

Спосіб визначення початкових даних для алгоритму ідентифікації об'єкта керування за характерними точками ґрунтується на тому, що динаміка перехід-

ного процесу описується такими параметрами, як швидкість зміни параметра v , прискорення a , швидкість прискорення va і та ін. (рис. 4), які є відповідними похідними від вихідного сигналу y за часом t .

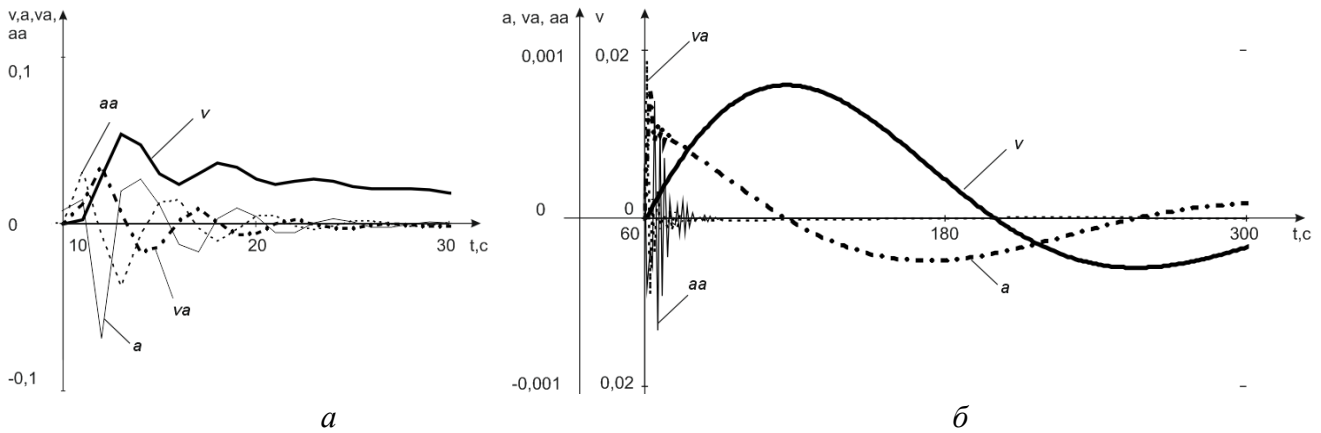


Рис. 4. Графіки похідних за часом перехідної характеристики:
 a – аперіодичний процес; b – коливальний процес (v – швидкість; a – прискорення;
 va – швидкість прискорення; aa – прискорення прискорення)

Часові характеристики об'єкта керування залежать від його властивостей (об'єм, конструктивні особливості, теплоємність матеріалів, з яких виготовлено апарат, властивості каталізатора тощо) та властивостей речовини, яка в ньому знаходиться. Відповідно до цього координати екстремумів максимуму та мінімуму на часових характеристиках будуть визначатися цими параметрами об'єкта керування.

Як випливає з рис. 4, при перехідних процесах відбуваються дуже характерні сплески значення швидкості v , прискорення a , швидкості прискорення va , прискорення прискорення aa , тобто вони мають характерні точки – точки глобальних екстремумів, які визначаються однозначно та максимально характеризують перехідний процес, тобто розкривають найбільш важливі властивості об'єкта. Тому, під час апроксимації бажано забезпечити найменшу похибку саме в цих точках. Отже їх можна використовувати як початкові дані для алгоритму ідентифікації об'єкта керування.

На підставі дослідження було проведено узагальнену залежність максимального відхилення між реальною та апроксимованою характеристиками (δ_{max}) від кількості точок N для обох способів вибору початкових даних (рис. 5).

Проаналізовано результати досліджень, з яких зроблено висновок, що при використанні характерних точок двох похідних, похибка апроксимації (максимальне відхилення між кривими δ_{max}) не перевищує 3%.

Подальше збільшення кількості характерних точок третьої, четвертої і так далі похідних на похибку апроксимації практично не впливає (рис. 5, б). Тому при ідентифікації параметрів математичних моделей ланками 2-го порядку з запізненням достатньо взяти характерні точки тільки перших двох похідних (швидкість v та прискорення a). Це дозволяє суттєво полегшити процес аналізу

і оптимізації динамічних характеристик систем автоматичного керування та суттєво спрощує пошук оптимальних налаштувань ПД-регулятора за квадратичною оптимізаційною функцією.

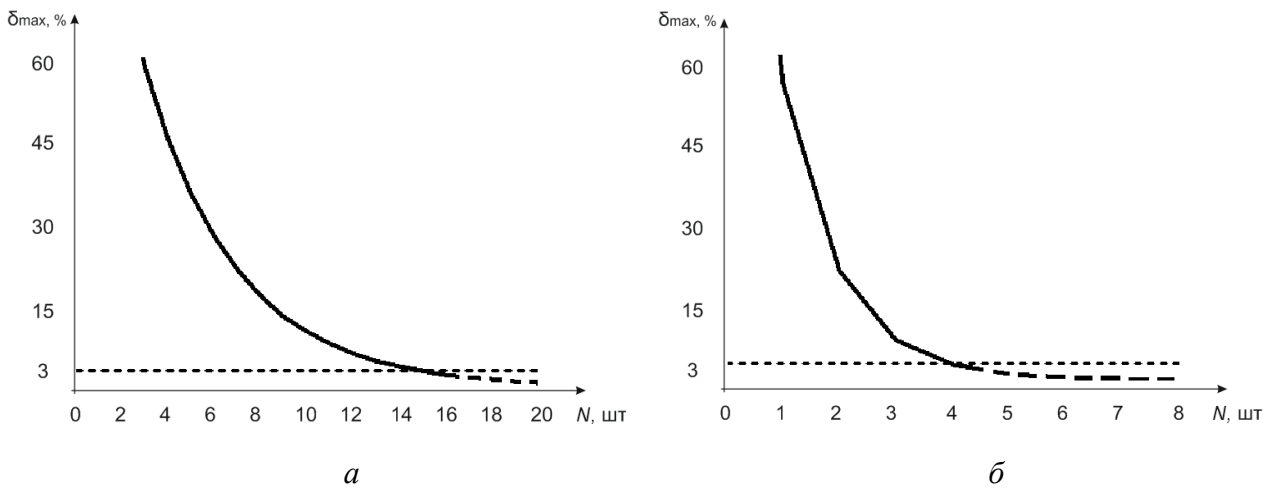


Рис. 5. Графіки узагальненої залежності δ_{max} від N для алгоритму ідентифікації об'єктів керування за: *а* – рівномірним розподілом точок; *б* – характерними точками

Досліджено низку об'єктів керування з різним ступенем коливальності та інерційності. Виконано порівняльний аналіз способів вибору початкових даних з якого зроблено висновок, що спосіб вибору початкових даних для ідентифікації об'єктів керування за характерними точками кращий ніж за рівномірним розподілом точок через те, що: по-перше, координати характерних точок визначаються однозначно; по-друге, вони можуть бути визначені як у процесі зняття характеристики, так і після; по-третє, кількість точок, що використовуються при забезпеченні заданої точності, зменшується в 1,5–3 рази порівняно з алгоритмом рівномірного розподілу точок.

Третій розділ присвячено розробці алгоритму пошуку оптимальних налаштувань ПД-регулятора на основі інтегральної оптимізаційної функції. Обґрунтовано вибір інтегральних критеріїв якості, які є найбільш універсальним і застосовуються в інженерній практиці для оцінювання узагальнюючих властивостей систем автоматичного керування: точність, запас стійкості, швидкодія. За величиною інтегралів можна приблизно судити про якість перехідного процесу. Показники якості при цьому зв'язуються з площами, укладеними між підінтегральною функцією і віссю часу. Якщо система із стану рівноваги переходить до нового стану рівноваги, то практично нездійсненним ідеалом перехідного процесу буде процес, за якого регульований параметр миттєво досягає заданого нового сталого значення, тобто коли перехідний процес має стрибкоподібну форму. Реальний перехідний процес, що має вигляд, показаний на рис. 6, тим менше буде відрізнятися від ідеального перехідного процесу, чим менше буде заштрихована площа.

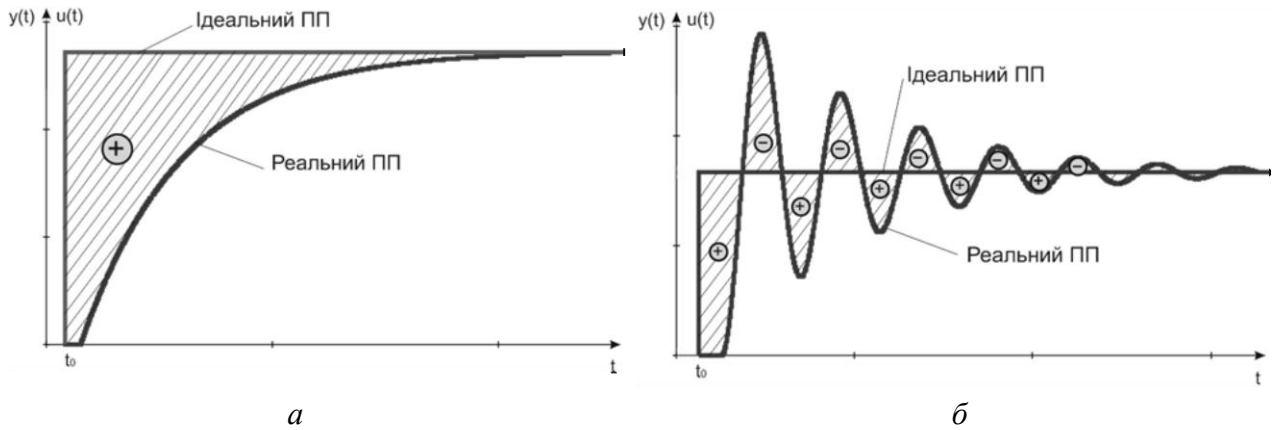


Рис. 6. Геометричний зміст інтегрального критерію якості:

a – для аперіодичного перехідного процесу регулятора; *б* – для коливального

Обґрунтовано вибір інтегральної квадратичної функції, як критерію оптимальності роботи системи. Вона залежить від коефіцієнтів передаточної функції системи і в свою чергу, залежить від обраних налаштовувальних параметрів ПД-регулятора: коефіцієнта регулювання, K_p , часу інтегрування T_i , часу диференціювання T_d .

Тому показником якості роботи системи автоматичного керування є величина відхилення від заданого значення, яка може бути наведена у вигляді функції трьох змінних:

$$J = \int_0^{\infty} y^2(t) dt = f(K_p, T_i, T_d), \quad (3)$$

де $y(t)$ – вихідний сигнал, функція часу, що характеризує відхилення регульованого параметра від заданого значення.

$$y(t) = L^{-1}\{W(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{W_p(s) \cdot W_{EOK}(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{EOK}(s)}\right\}, \quad (4)$$

де L^{-1} – зворотне перетворення за Лапласом;

$W(s)$ – передаточна функція замкнутого контуру;

$W_p(s) = K_p + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s$ – передаточна функція ПД-регулятора;

$W_{EOK}(s) = \frac{K_{II} \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_2^2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1}$ – передаточна функція ланки 2-го порядку еквівалентного об'єкту керування.

Запропоновано алгоритм пошуку оптимальних налаштувань ПД-регулятора, в основу якого покладено розв'язок оптимізаційної задачі: знаходження таких значень K_p , T_i , T_d , при яких квадратичний інтегральний критерій був би мінімальним:

$$J = f(K_p, T_i, T_d) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для більшості процесів квадратичний інтегральний критерій є унімодальною функцією, що дає можливість застосування запропонованого алгоритму.

У роботі наведено розв'язання оптимізаційної задачі для систем з П-, ПІ- та ПІД-регуляторами. На рис. 7 як приклад надано графічну інтерпретацію розв'язання оптимізаційної задачі пошуку оптимальних налаштувань ПІ-регулятора. Такий регулятор має два налаштовувальні параметри – коефіцієнт регулювання K_p і час інтегрування T_i . Тому квадратичний інтегральний критерій буде функцією двох змінних $J_2 = f(K_p, T_i)$, а графік цієї функції буде поверхнею (рис. 7). Загальний аналітичний розв'язок наведено в дисертації.

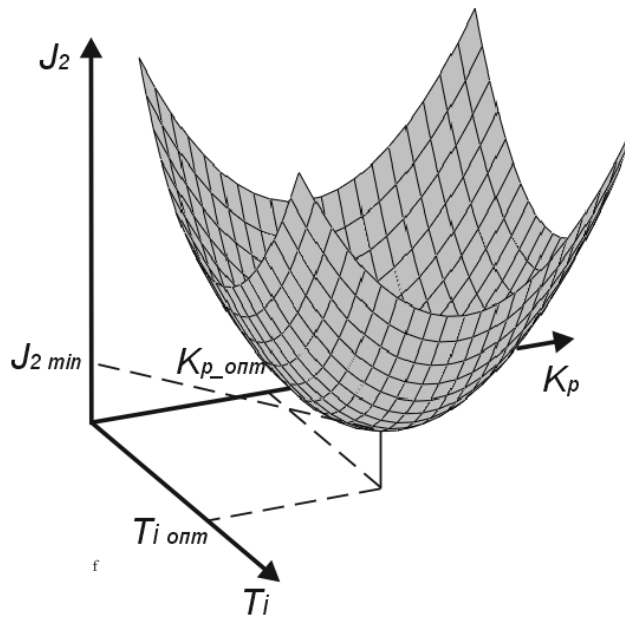


Рис. 7. Пошук оптимальних налаштовувальних параметрів для ПІ-регулятора

Значення K_p і T_i знаходяться, використовуючи метод сполучених градієнтів, за умови $J_2 = \min$. Знайдені в такий спосіб значення K_p і T_i , за яких квадратичний інтегральний критерій буде мінімальним, і будуть оптимальними налаштовувальними параметрами для ПІ-регулятора.

Таким чином, у третьому розділі дисертації обґрунтовано вибір критерію якості, на основі якого знаходяться оптимальні налаштування ПІД-регулятора; обґрунтовано вибір інтегральної квадратичної функції; проаналізовано переваги та недоліки найбільш поширених в інженерній практиці методів оптимізації; запропоновано алгоритм пошуку оптимальних налаштувань ПІД-регулятора на основі інтегральної квадратичної оптимізаційної функції, в якому в якості передаточної функції еквівалентного об'єкта керування приймається апроксимована за характерними точками функція ланки другого порядку з запізненням.

Четвертий розділ присвячено розробленню комбінованої моделі колони синтезу метанолу і питанням її адаптації до умов реально діючого об'єкта керування, розробці системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу у виробництві метанолу, алгоритму функціонування системи.

Інформаційно-логічну схему колони синтезу метанолу наведена на рис. 8. Аналіз технологічного процесу, який проходить у триполичному газовому реакторі (колоні синтезу метанолу), як об'єкта керування показує, що технологічний об'єкт має дві вихідні координати: концентрацію метанолу Q_3 на виході з реактора та температуру T_3' газу на виході колони після теплообмінника. Для даного об'єкта температурний режим (профіль температур) по висоті газового реактора однозначно визначає концентрацію цільового компонента на його виході, а отже, і температуру T_3 , яка визначає температури T_0 і T_3' . Виходячи з того, що з достатнім ступенем точності об'єкт можна розглядати як замкнену термодинамічну систему, величина концентрації Q_3 однозначно визначає температури T_3 і, відповідно, T_0 і T_3' . Тому регулювання або стабілізація температури T_3' не має в цьому випадку особливого значення. Особливістю даного об'єкта є те, що для регулювання одного параметра – концентрації метанолу Q_3 використовуються три регулюючі параметри – витрати синтез-газу по холодним байпасам на полиці з каталізатором. До збурюючих параметрів процесу відноситься витрата циркуляційного газу $F_{ц.г.}$, температура циркуляційного газу $T_{ц.г.}$ і концентрація метанолу на вході реактора Q_0 . Тиск циркуляційного газу P можна віднести до збурюючих координат, оскільки: по-перше, цей параметр стабілізується компресором синтез-газу; по-друге, при ступені конверсії синтез-газу в готовий продукт порядку 5% зменшення тиску за рахунок реакції становить приблизно 2,5%. Отже, при зміні ступеня конверсії в межах 4...6% тиск зміниться в межах 2...3%, що укладається в похибку вимірювального каналу тиску.

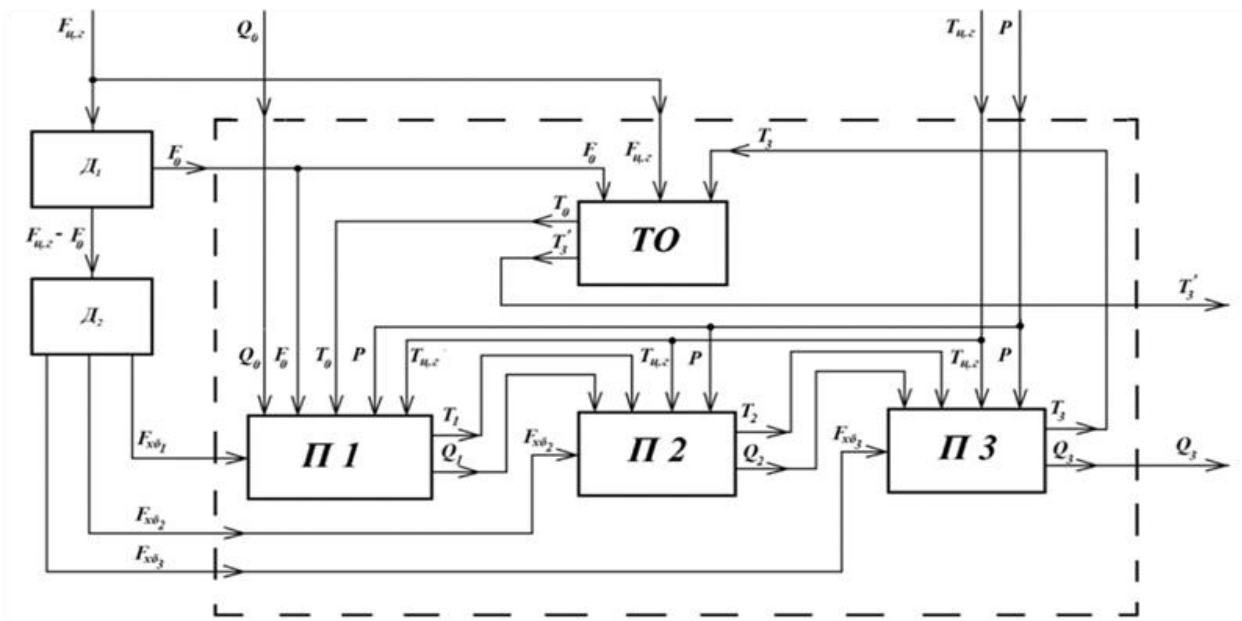


Рис. 8. Інформаційно-логічна схема колони синтезу метанолу

Мета оптимального керування колоною синтезу метанолу полягає в тому, щоб таким чином перерозподілити циркуляційний синтез-газ по фізичних кана-

лах колони синтезу, щоб досягти максимального ступеня конверсії, і, відповідно, максимальної концентрації метанолу на виході колони.

Для розв'язання поставленого завдання в даній роботі пропонується розробити математичну модель і розв'язати оптимізаційну задачу. На першому етапі розробляється детермінована модель. Незважаючи на її невисоку точність, вона дає можливість оцінити вид критеріальної функції в широкому діапазоні зміни аргументів з урахуванням її багатоекстремальності і виділити область глобального екстремуму. На другому етапі виконується адаптація моделі на основі експериментальних даних, що одержуються з об'єкта керування, на основі ймовірнісних методів. Це дозволяє забезпечити точність параметрів, що моделюються, шляхом урахування всіх впливів.

Створення адекватної моделі має на меті врахування нелінійності залежностей вихідних параметрів процесу від вхідних. Це неминуче призводить до збільшення ступеня рівнянь, якими описується об'єкт керування. Використання рівнянь високих порядків суттєво ускладнює процес оптимізації – пошук оптимальних значень параметрів технологічного процесу. У більшості випадків доводиться використовувати наближені розв'язання. Це знижує точність розроблюваної математичної моделі.

Розглянемо першу полицю колони синтезу, як газовий реактор і складемо для неї рівняння теплового й матеріального балансів:

$$\begin{cases} F_{x\delta 1}c_1T_{x\delta 1} + F_0c_1T_0 + r\rho_1V_1K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right)\frac{P}{P_0}(Q_1 - Q_0) = (F_0 + F_{x\delta 1})c_1T_1 \\ F_{x\delta 1}Q_0 + F_0Q_0 + \rho_1V_1K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right)\frac{P}{P_0}(Q_1 - Q_0) = (F_0 + F_{x\delta 1})Q_1 \end{cases}, \quad (6)$$

де $F_{x\delta 1}$ і F_0 – витрати синтезу газу по холодному байпасу й основного ходу на першу полицю, $кг/с$; $T_{x\delta 1}$ і T_0 – температури циркуляційного газу й газу, що подається на вхід першої полиці, $К$; c_1 – теплоємність газової суміші, $Дж/(кг*К)$; r – питома теплота реакції, $Дж/кг$; ρ_1 – густина газового потоку, $кг/м^3$; V_1 – реакційний об'єм, $м^3$; E – енергія активації, $Дж/моль$; K – константа швидкості реакції, $л/с$; P і P_0 – поточний і номінальний тиск процесу, $Па$; T_1 – температура на першій полиці, $К$; Q_0 і Q_1 – концентрація метанолу на вході й виході полиці, $мас. частки$.

Система рівнянь (6) являє собою статичну математичну модель першої полиці колони синтезу метанолу.

$$\begin{cases} (F_{x\delta 1} + F_0)c_1T_1 + F_{x\delta 2}c_1T_{x\delta 2} + r\rho_2V_2K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right)\frac{P}{P_0}(Q_2 - Q_1) = (F_0 + F_{x\delta 1} + F_{x\delta 2})c_2T_2 \\ F_{x\delta 2}Q_0 + (F_0 + F_{x\delta 1})Q_1 + \rho_2V_2K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right)\frac{P}{P_0}(Q_2 - Q_1) = (F_0 + F_{x\delta 1} + F_{x\delta 2})Q_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (F_{x\delta 2} + F_{x\delta 1} + F_0)c_2T_2 + F_{x\delta 3}c_1T_{x\delta 3} + r\rho_3V_3K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_3}\right)\frac{P}{P_0}(Q_3 - Q_2) = (F_0 + F_{x\delta 1} + F_{x\delta 2} + F_{x\delta 3})c_3T_3 & (8) \\ F_{x\delta 3}Q_0 + (F_0 + F_{x\delta 1} + F_2)Q_2 + \rho_3V_3K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_3}\right)\frac{P}{P_0}(Q_3 - Q_2) = (F_0 + F_{x\delta 1} + F_{x\delta 2} + F_{x\delta 3})Q_3 \end{cases}$$

Аналогічним чином складемо матеріальний і тепловий баланси другої і третьої полиць колони (у рівняннях (7) і (8) індекси 2 і 3 вказують на нумерацію полиці колони).

Математичну модель вбудованого теплообмінника складемо на основі його теплового балансу

$$F_0c_1(T_0 - T_{ц2}) = F_{ц2}c_3(T_3 - T_3'), \quad (9)$$

де T_3' – температура газової суміші на виході теплообмінника, K ;

$F_{ц2} = F_0 + F_{x\delta 1} + F_{x\delta 2} + F_{x\delta 3}$ – витрата циркуляційного газу, $кг/с$.

Рівняння (6)–(9) утворюють систему рівнянь. Розв'язок даної системи може бути наведено у вигляді:

$$\begin{aligned} a_4Q_3^4 + a_3Q_3^3 + a_2Q_3^2 + a_1Q_3 + a_0 = \varphi_1(F_{x\delta 1}) + \varphi_2(F_{x\delta 2}) + \varphi_3(F_{x\delta 3}) + \varphi_{12}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}) + \varphi_{13}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 3}) + \\ + \varphi_{23}(F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}) + \varphi_{123}(F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}) + \Omega(F_{ц2}, T_{ц2}, Q_0, P), \end{aligned} \quad (10)$$

де a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 – коефіцієнти моделі;

Q – концентрація метанолу на виході колони;

$F_{ц2}, F_{x\delta 1}, F_{x\delta 2}, F_{x\delta 3}$ – витрати синтез-газу по всіх вхідних потоках реактора (основний хід і «холодні» байпаси);

$T_{ц2}, Q_0, P$ – температура, концентрація цільового компонента й тиск циркуляційного газу;

$\Omega(F_{ц2}, T_{ц2}, Q_0, P)$ – функціонал впливу збурюючих параметрів;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{23}, \varphi_{123}$ – функції, які враховують вплив зміни витрат на зміну концентрації метанолу на виході колони.

Рівняння (10) є математичною моделлю триполичної колони синтезу метанолу. Детермінований підхід дозволив провести структурну ідентифікацію й визначити вид математичної моделі колони синтезу метанолу у виробництві метанолу. В якості моделі ухвалюється рівняння четвертого порядку за концентрацією метанолу. Ця модель є вихідною для системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу у виробництві метанолу. Модель досить проста: у рівнянні четвертого порядку невідома величина завжди може бути визначена через коефіцієнти рівняння. Тобто, при адаптації моделі функціональний вигляд залежностей змінюватися не буде, а змінюватимуться тільки коефіцієнти.

Під час роботи колони параметри процесу змінюються під впливом неконтрольованих збурюючих впливів, які не входять у модель. До таких параметрів

можна віднести: концентрацію газів-інертів у синтез-газі, стан (пробіг) катализатора і т.д. Ці зміни призводять до того, що вимірне значення концентрації цільового компонента й розраховане за моделлю будуть відрізнятися на величину більшу, ніж встановлено. Тобто, виникає необхідність коригування коефіцієнтів лівої частини математичної моделі об'єкта керування: a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 . У роботі запропоновано це завдання вирішувати з використанням рекурентного методу найменших квадратів.

Внаслідок коригування коефіцієнтів лівої частини моделі порушується рівність між правою й лівою частинами моделі. Тому наступним етапом процесу адаптації є коригування коефіцієнтів правої частини моделі.

Після коригування коефіцієнтів при концентрації метанолу, детермінована математична модель перестає бути детермінованою й стає експериментально-статистичною.

Отримана в такий спосіб математична модель колони синтезу використовується в алгоритмі керування для розв'язання оптимізаційної задачі.

Для розробки динамічної математичної моделі газового реактора (полки колони синтезу метанолу) необхідно скласти часткові динамічні моделі по концентрації й температурі, а потім розв'язати їх спільно щодо параметра, який цікавить. Записавши систему рівнянь (6) у диференціальному вигляді, виконавши лінеаризацію, виключивши рівняння статички й перейшовши до безрозмір-

них координат ($\frac{\Delta Q}{Q_0} = y_1$; $\frac{\Delta T}{T_0} = y_2$; $\frac{\Delta P}{P_0} = y_3$; $\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = x_1$; $\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\Delta S}{S_0} = x_2$; $\frac{\Delta T_1}{T_{10}} = z_1$; $\frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} = z_2$; $\frac{\Delta T_2}{T_{20}} = z_3$; $\frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} = z_4$; $\frac{\Delta F_2}{F_{20}} = z_5$; $\frac{\Delta Q_H}{Q_{H0}} = z_6$; $\frac{\Delta P}{P_0} = z_7$), одержимо систему рівнянь (11):

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 + K_{15}z_6 + K_{16}y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 + K_{24}z_5 + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1 \end{cases}, \quad (11)$$

де $\tau_1 = \frac{\rho V Q_0}{\Pi_1}$, $\tau_2 = \frac{\rho V c T_0}{\Pi_2}$ – постійні часу, c ;

$$\Pi_1 = Q_1 \left[F_1 + F_2 - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} \right]; \quad \Pi_2 = \left[(F_{10} + F_{20}) c T_0 - \frac{E}{RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{11} = \frac{(Q - Q_2) F_{20}}{\Pi_1}; \quad K_{12} = -\frac{Q_1 F_1}{\Pi_1}; \quad K_{13} = -K_{14} = -\frac{Q_2 F_2}{\Pi_1}; \quad K_{15} = \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_n \frac{P}{P_0}}{\Pi_1};$$

$$K_{16} = \frac{\frac{E}{RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0}}{\Pi_1}; \quad K_{21} = \frac{(c_2 T_{20} - c T_0) F_{20}}{\Pi_2}; \quad K_{22} = \frac{F_{10} c_1 T_{10}}{\Pi_2}; \quad K_{23} = \frac{F_{20} c_2 T_{20}}{\Pi_2};$$

$$K_{24} = \frac{F_{10}(c_1 T_{10} - c T_0)}{\Pi_2}; \quad K_{25} = -\frac{r\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_{H0} \frac{P}{P_0}}{\Pi_2}; \quad K_{26} = \frac{r\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q_0 - Q_{H0}) \frac{P}{P_0}}{\Pi_2};$$

$$K_{27} = \frac{r\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_0 \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} - \text{коефіцієнти.}$$

Система рівнянь (11) можна розв'язати будь-яким методом, наприклад використовуючи матричний метод розв'язання систем рівнянь.

Аналогічним чином складаються системи рівнянь для другої й третьої полиць колони. Ці три системи рівнянь разом з динамічною математичною моделлю внутрішнього теплообмінника, який являє собою кожухотрубний теплообмінник, складають динамічну модель колони синтезу метанолу у виробництві метанолу.

Комбінована форма моделі, що запропонована в роботі, дозволяє використовувати переваги експериментально-статистичного і детермінованого підходів для досягнення високої адекватності, легкої адаптованості й широкого діапазону застосування. Що є ключовими аспектами при оптимізації й керуванні складними технологічними об'єктами. Отримана ж у роботі динамічна модель дає змогу адекватно описати характер зміни в діапазоні, що значно перевищує регламентні границі. Це особливо важливо при використанні моделі в системах контролю безпеки агрегату синтезу метанолу й технологічних тренажерах. Розрахунок у моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати й враховувати такий важливий параметр як зміна активності каталізатора. Цей показник дуже важливий при визначенні необхідності адаптації моделі, яка одночасно забезпечує її адекватність як у системах оптимізації, так і в автоматизованій системі керування.

Для того щоб знайти максимум концентрації метанолу на виході колони синтезу метанолу для фіксованого значення навантаження $F_{ц.г.}$, доцільно застосувати багатопараметричну оптимізацію. Сучасні засоби обчислювальної техніки, що використовуються для керування виробництвом, дозволяють у прийнятний час одержати розв'язок. Проте, одержати бажаний розв'язок завдання в даній постановці навряд чи можливо. Здебільшого це пов'язане з наявністю сильних неконтрольованих збурень на об'єкті. До них відносяться: зміна активності каталізатора, зміна гідродинамічних режимів у колоні тощо. Тому розв'язок багатопараметричної оптимізаційної задачі моделі можна розглядати не більше як швидкий крок у близьку околицю точки екстремуму.

Для цього необхідно побудувати зрізи функції (9) для фіксованих значень витрат $F_{х63}$ у діапазоні від мінімального до максимального значення з певним кроком. Графічний розв'язок даного рівняння для довільно обраного зрізу на дано на рис. 9.

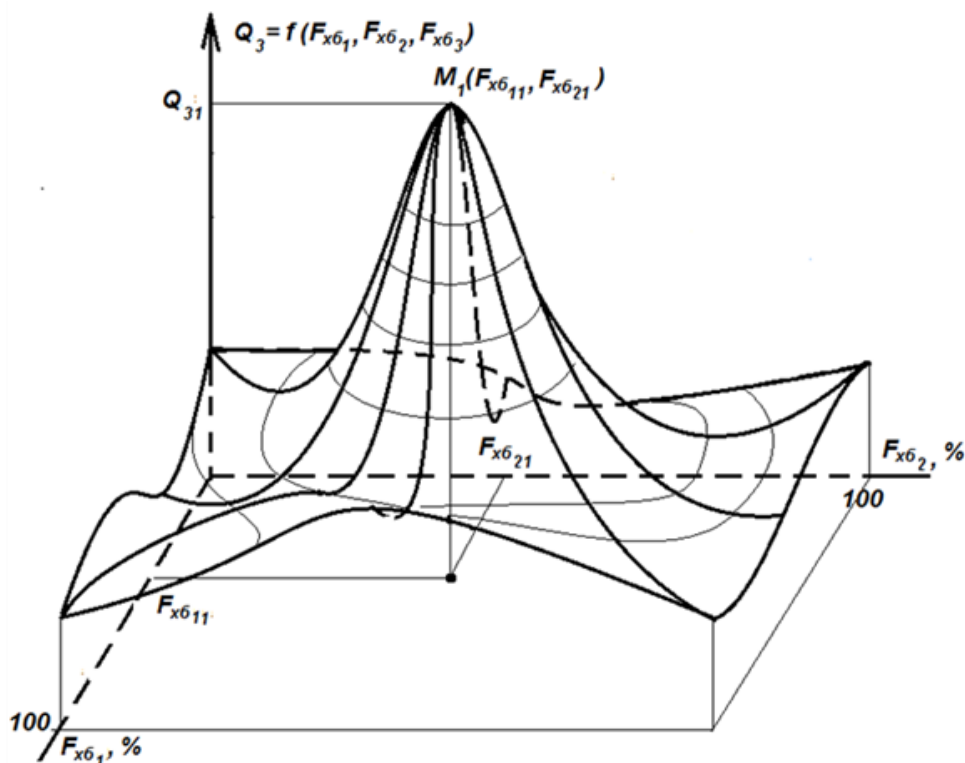


Рис. 9. Графічний розв'язок оптимізаційної задачі для довільного зрізу

Результатом розв'язання оптимізаційної задачі в алгоритмі роботи системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу у виробництві метанолу для заданого навантаження на агрегат ($F_{ц.г.} = const$) є оптимальні значення витрат синтез-газу по фізичним каналам «холодних» байпасів. Отримані значення витрат реалізуються через роботу виконавчих механізмів і регулюючих клапанів, встановлених у лініях подачі «холодних» байпасів. Таким чином, у роботі системи керування реалізується швидкий вихід об'єкта керування на режим, близький до оптимального.

Ураховуючи, що точність моделі неоднакова у всіх точках процесу, координати реального екстремуму концентрації (експериментальне значення) можуть відрізнятися від розрахованого за моделлю теоретичного значення. Для більш точного переходу об'єкта в оптимальний режим на наступному етапі роботи системи пропонується використовувати пошуковий алгоритм Хука-Дживса.

Інформація, отримана при переході об'єкта керування в область, близьку до оптимальної, використовується як базисна точка пошукового алгоритму. Крім того, дані, що отримані по детермінованій моделі, використовуються при визначенні напрямку пошуку за зразком і величиною кроку. Це дозволяє суттєво скоротити число пробних кроків при реалізації алгоритму, час пошуку й підвищити ймовірність знаходження найближчої околиці дійсного оптимуму.

Для реалізації запропонованої системи керування з моделлю в роботі розроблено алгоритм функціонування цієї системи. Схематично алгоритм наведено на рис. 10.

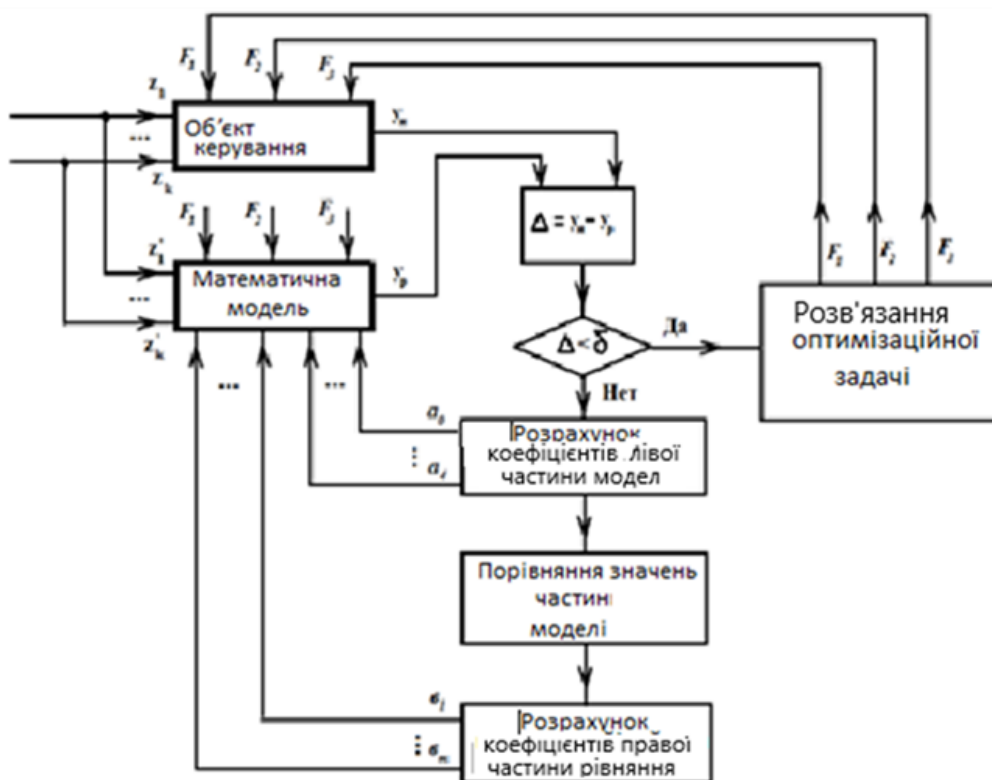


Рис. 10. Блок-схема алгоритму функціонування системи керування з моделлю

Працює алгоритм таким чином. Значення витрат «холодних» байпасів, основного ходу та циркуляційного газу, а також усіх інших параметрів колони, що входять у модель за концентрацією колони синтезу метанолу, вимірюються відповідними інформаційно-вимірювальними каналами і подаються на вхід математичної моделі. На виході алгоблока, який реалізує математичну модель колони синтезу метанолу, формуються розрахункові значення концентрації метанолу і температури газу на виході колони. Ці значення порівнюються з відповідними реальними значеннями. У випадку, якщо різниця між ними перевищує припустиме значення, запускається алгоритм корегування моделі.

Особливістю цього алгоритму є використання блоку адаптації моделі. Адаптація моделі відбувається в описаний раніше спосіб. Після виконання процедури коригування коефіцієнтів моделі різниця між виміряними та розрахованими за моделлю значеннями концентрації метанолу на виході колони та температури газу на виході колони не буде перевищувати припустиме значення. За виконання цієї умови запускається процедура пошуку оптимального розв'язання. З уточненої математичної моделі формується критерій оптимальності. Фактично він являє собою похідну концентрації метанолу на виході колони за витратами «холодних» байпасів, що дорівнює нулю. Після цього, знаходиться максимально можлива в цих умовах концентрація метанолу на виході колони та значення витрат «холодних» байпасів, що відповідають їй. Отримані значення витрат «холодних» байпасів перераховуються в ступінь відкриття відповідних клапанів. Ці значення, перетворені в керуючий сигнал, подаються на

регулюючи клапани. У разі зміни витрат «холодних» байпасів та основного ходу в колоні відбудеться перерозподіл внутрішніх потоків і, як наслідок, відбудуться перехідні процеси, що пов'язані зі зміною профілю температур за висотою колони. Це спричинить зміну концентрації метанолу на виході кожної полиці колони. Тривалість перехідних процесів відповідно до регламенту та розробленої математичної моделі становить 40 хвилин. Під час руху системи до нового стану рівноваги процес перерахунку статичної моделі зупиняється. Після того, як перехідні процеси в колоні закінчуються, запускається алгоритм перевірки адекватності статичної математичної моделі колони. У випадку, якщо це необхідно, запускається алгоритм адаптації моделі, як це було описано раніше. Після адаптації моделі проводиться розв'язання оптимізаційної задачі і визначаються оптимальні значення витрат «холодних» байпасів та основного ходу. У випадку, якщо вони не збігаються з поточними, рух до оптимального значення продовжується. Після виходу системи на умови екстремуму, що розраховано теоретично, включається алгоритм Хука-Дживса, який дозволяє провести більш точне налаштування системи

П'ятий розділ. Наведено аналіз впливу неузгодженої роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стабільність виробничого процесу синтезу метанолу. Запропоновано нетрадиційний підхід до регулювання роботи вузла охолодження і конденсації, заснований на принципі компенсації збурень шляхом вибору оптимальної схеми включення елементів вузла охолодження та конденсації. Спрощену функціональну схему запропонованого технічного рішення показано на рис. 11.

Виходячи з аналізу даної проблематики, процес охолодження і конденсації необхідно вести не за відхиленням температури на виході вузла, а за показниками приладу контролю температури парогазової суміші на вході, що дозволить своєчасно компенсувати збурення. При цьому для стабілізації процесу теплообміну доцільно застосувати систему дискретного регулювання, у якій буде задіяне лише існуюче технологічне, контрольоване та електросилове устаткування. Сама система регулювання може бути реалізована у вигляді математичного алгоритму, що виконується в комп'ютері або в контролері.

Результатом роботи керуючого алгоритму є вмикання (або вимикання) однієї або декількох пар апаратів повітряного охолодження при зміні температури на вході вузла, з урахуванням витрати газопродуктової суміші та температури повітря. Якщо при всіх працюючих апаратах повітряного охолодження не вдається відвести необхідну кількість тепла, то вмикається зрошення на одному або декількох холодильниках.

При цьому головною проблемою, а відповідно й завданням дослідження, було визначення умов, за якими дискретне керування об'єктом буде наближатись за якістю до аналогового.

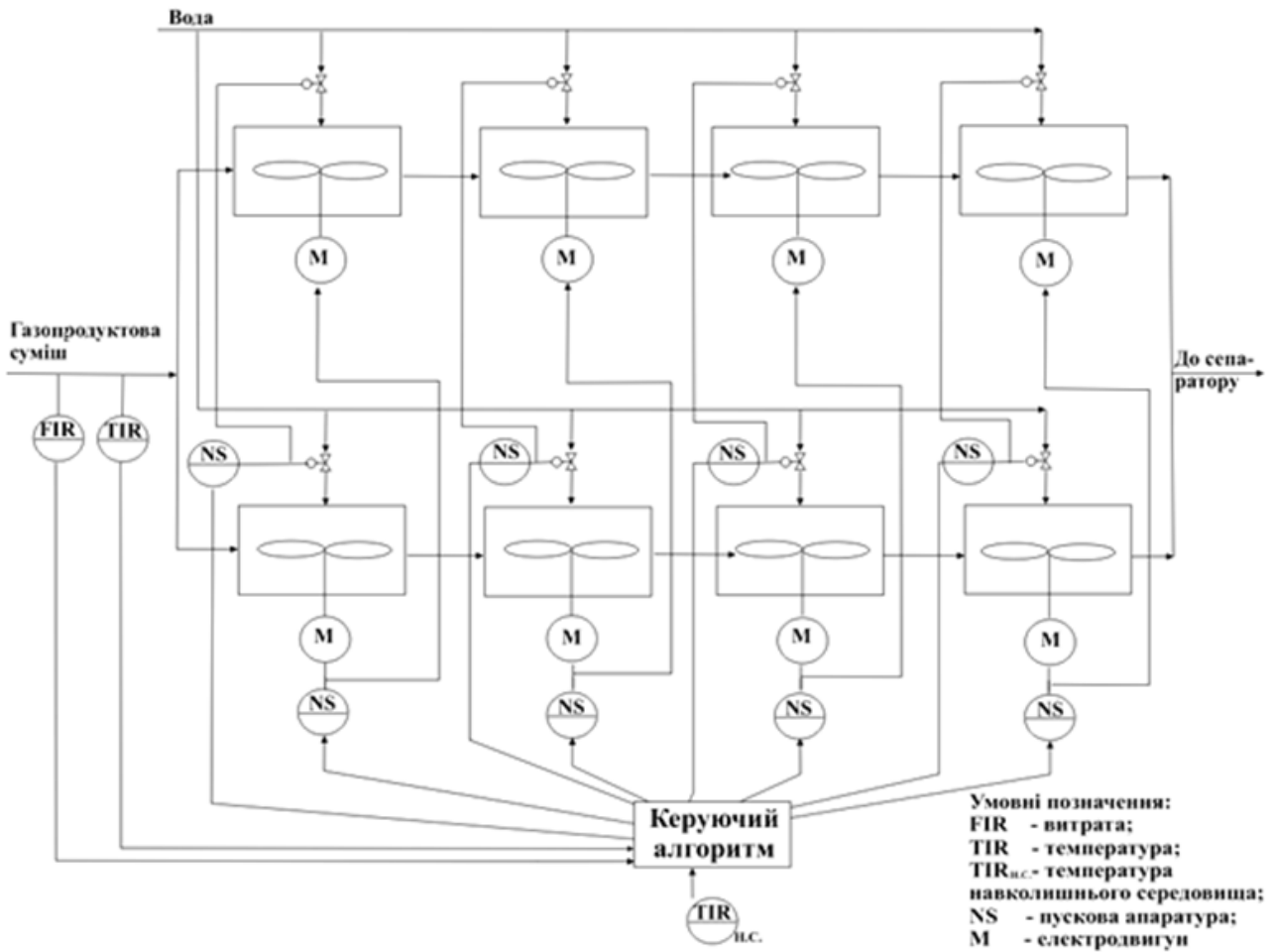


Рис. 11. Схема автоматизації вузлу охолодження і конденсації із застосуванням дискретної системи керування з моделлю на базі керуючого алгоритму

Дійсно, при послідовному ввімкненні ефективність теплообміну в холодильниках повітряного охолодження буде різною (залежно від перепаду температур на вході кожного теплообмінника і температури навколишнього середовища). Перший холодильник працює з найбільшою ефективністю, а останній – з найменшою. Отже, на теплообміннику кожного холодильника відбуватиметься падіння температури на певну величину: на першому – на Δ_1 , на другому – на Δ_2 , на третьому – на Δ_3 , а на четвертому – на Δ_4 . Причому $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3 > \Delta_4$. У разі ввімкнення повітряного охолодження на холодильниках відбувається додаткове зниження температури на величини, відповідно, $\Delta_1' > \Delta_2' > \Delta_3' > \Delta_4'$.

У дисертації розроблено математичні моделі апарату повітряного охолодження в різних режимах роботи:

1) під час вимкненого вентилятора

$$3.76 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 19.26 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = 0.63 \cdot \left(-79.78 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1\right) + 0.27 \cdot \left(19.08 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3\right) + 0.44 \cdot z_4 \quad (12)$$

2) при увімкненому вентиляторі

$$1.37 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 7.15 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -1.44 \cdot \left(12.71 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1\right) + 0.27 \cdot \left(6.96 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3\right) + 1.88 \cdot z_4 \quad (13)$$

3) у разі увімкненої системи зрошення

$$0.19 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 1.16 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = -2.47 \cdot (1.03 \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1) + 0.27 \cdot (0.96 \cdot \frac{dz_3}{dt} + z_3) + 2.59 \cdot z_4 \quad (14)$$

Ці математичні моделі дали змогу запропонувати пошуковий алгоритм роботи системи керування вузлом охолодження та конденсації у виробництві метанолу. Алгоритм працює таким чином. В поточних умовах за моделями розраховується температура газової суміші на виході вузла за всіх можливих комбінацій увімкнення вентиляторів. Далі обираються всі комбінації у яких температура відповідає заданому значенню. Серед обраних комбінацій обирається та, у якій кількість увімкнених вентиляторів, а, відповідно, і споживана електрична потужність, буде мінімальною. У роботі запропоновано розв'язувати цю задачу шляхом систематичного перерахунку моделі. Кількість можливих комбінацій становить 256. Застосовуючи пошуковий алгоритм, система, з урахуванням реальної продуктивності кожного апарату, вмикає їх у такому наборі та послідовності, щоб мінімізувати стрибок температури газопродуктової суміші на виході вузла загалом. Оскільки апарати повітряного охолодження розташовані на відкритому майданчику, процес теплообміну залежить від кліматичних умов. Тому в алгоритмі необхідно враховувати температуру повітря навколишнього середовища.

Розроблена математична модель дала змогу визначити інерційність процесу теплообміну вузла охолодження і конденсації. Час затримки становить близько 20 хвилин. Враховуючи, що зміна температури навколишнього повітря протягом доби може скласти суттєву величину, запропоновано в алгоритмі роботи системи врахувати короткочасовий прогноз погоди. Це дасть можливість запобігти зміні температури газометанольної суміші на виході вузла охолодження і конденсації при добових змінах температури навколишнього повітря. Крім того, розроблена статична модель (наведена в дисертації) дозволила врахувати ступень забруднення теплообмінних поверхонь та визначити цей показник чисельно, а також здійснити контроль забруднення теплообмінних поверхонь і запропонувати систему очищення, яка буде спрацьовувати, коли показник забруднення досягає межового значення.

Запропонований підхід до регулювання роботи вузла охолодження і конденсації є найбільш оптимальним, оскільки не вимагає використання додаткового обладнання і дозволяє обійтися тільки тими технічними засобами, які вже встановлені на виробництві. Дана система керування виключить імовірність «температурних ривків», різкої зміни перепаду тиску між виходом колони синтезу та прийомом циркуляційного компресора, і, як наслідок, виникнення збурюючих впливів, які можуть призвести до дестабілізації роботи агрегату синтезу метанолу.

Шостий розділ присвячено розробленню розподіленої системи керування виробництва метанолу, експериментальному дослідженню запропонованих си-

стем керування колоною синтезу, блоком охолодження та конденсації метанолу з моделями та дослідженню експериментально-теоретичного способу знаходження оптимальних настроювань ПД-регулятора.

Розроблено розподілену систему керування виробництвом метанолу (схема та опис наведено в дисертації), яка унаслідок реалізації в ній на середньому рівні способу знаходження оптимальних настроювань регулятора, забезпечила оптимальну роботу систем автоматичного регулювання.

Запропонований спосіб знаходження оптимальних настроювань ПД-регулятора враховує всі недоліки найбільш поширених інженерних методів пошуку настроювань регуляторів, об'єднує в собі два алгоритми: ідентифікації параметрів моделі з використанням точок глобальних екстремумів динамічних характеристик (див. розділ 2) і алгоритм пошуку оптимальних настроювань регуляторів за квадратичною оптимізаційною функцією (див. розділ 3). Для ілюстрації роботи запропонованого способу знаходження оптимальних настроювань ПД-регулятора наведено порівняльний аналіз показників якості роботи систем автоматичного регулювання з настроювальними параметрами, що отримано запропонованим способом, та найбільш поширеними в інженерній практиці способами (метод трикутника, метод Зіглера-Нікольса (З-Н) і методу CHR). Як об'єкт керування обрано низку апаратів виробництва метанолу як із аперіодичними так із коливальними кривими розгону. Результати досліджень наведені в дисертації.

На рис. 12 наведено результати роботи системи автоматичного керування температурою на полиці колони синтезу метанолу з настроюваннями регулятора, що отримано запропонованим та іншими способами.

З аналізу показників якості регулювання випливає, що перехідні процеси системи автоматичного регулювання температури на полиці колони синтезу метанолу, що отримані при настроюваннях регуляторів за запропонованим методом, мають найкращі показники якості регулювання.

Результати аналізу показників якості регулювання систем автоматичного регулювання (перерегулювання σ , час регулювання T_p , статична $\Delta_{ст}$ і динамічна J похибки) аперіодичними та коливальними об'єктами виробництва метанолу, у яких настроювання регуляторів були розраховані за допомогою запропонованого способу знаходження оптимальних настроювань регулятора, а також за методом трикутника, методом Зіглера-Нікольса і методом CHR, наведено в табл. 1 та табл. 2 відповідно.

Результати досліджень (рис. 12 б–г і табл. 1, 2) дозволяють зробити висновок про покращення динамічних властивостей системи при використанні оптимальних настроювань регулятора розрахованих запропонованим способом у порівнянні з найбільш поширеними інженерними методами пошуку настроювань регулятора для систем автоматичного регулювання з аперіодичними і коливальними об'єктами керування (ОК), адже перерегулювання зменшилося до 10 разів, час регулювання зменшився до 30%, статична і динамічна похибки зменшилися у 2–3 рази.

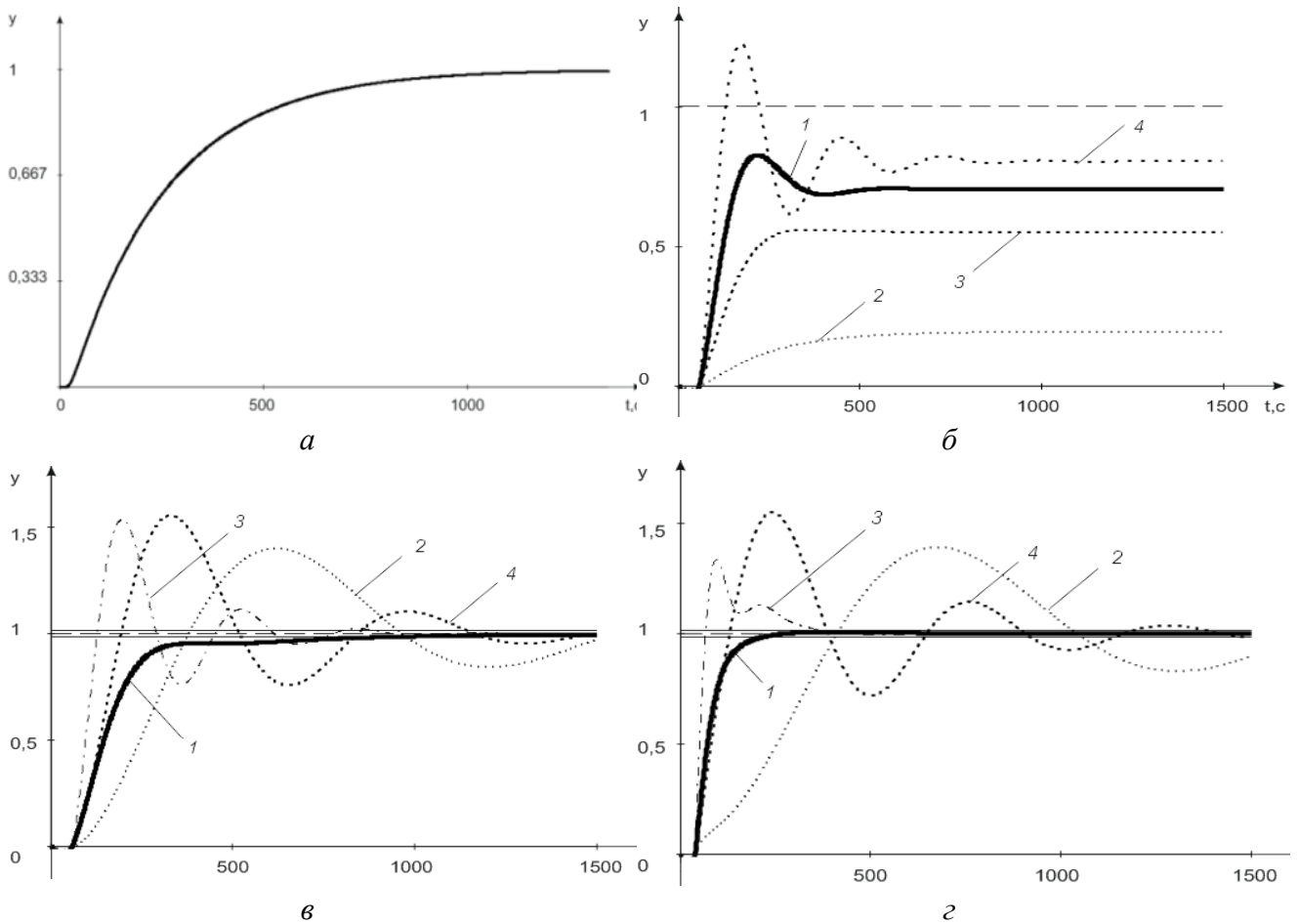


Рис. 12. Перехідні процеси системи автоматичного регулювання температури на полиці колони синтезу метанолу *а)* крива розгону ОК; *б)* ПП САР з П-регулятором; *в)* ПП САР з ПІ-регулятором; *г)* ПП САР з ПІД-регулятором:
 1 – запропонований спосіб; 2 – метод трикутника; 3 – метод З-Н; 4 – метод CHR

Наведено приклади практичної реалізації системи керування з моделлю колоною синтезу метанолу. Практична реалізація доволі складних алгоритмів стала можливою завдяки широкому застосуванню засобів обчислювальної техніки, що мають високу обчислювальну потужність. Завдяки тому, що швидкість і обсяг обчислювальних процедур перестає бути критичним обмеженням роботи системи, з'являється можливість оптимізувати структуру системи, підвищити дружність інтерфейсу, а також якість і надійність системи загалом. На відміну від способу керування колоною синтезу метанолу на реальному виробництві, де керування проводиться вручну з використанням рекомендацій технологічного регламенту, запропонована система керування з моделлю й алгоритм її функціонування дозволять вести технологічний процес синтезу метанолу в умовах, близьких до оптимальних. Ураховуючи багатотоннажність і безперервність виробництва метанолу (річний об'єм виробництва метанолу на ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання «Азот»» 100 тис. тон), економічна доцільність запропонованої системи не викликає сумнівів.

**Порівняльна таблиця якості роботи систем
автоматичного регулювання для ОК аперіодичного характеру**

Метод знаходження налаштувань регулятора	Закон регулювання	ОК	Налаштування регулятора			Показники якості регулювання			
			Kp	Ti	Td	σ	Δ_{cm}	Tp	J
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Запропонований спосіб	П-регулятор	Колона синтезу	2,39	∞	0,00	17,26	29,52	465,45	148,04
Метод трикутника			0,24	∞	0,00	0,00	80,39	816,34	665,90
Метод З-Н			4,12	∞	0,00	52,36	19,52	765,26	130,18
Метод CHR			1,24	∞	0,00	1,31	44,70	202,83	273,18
Запропонований спосіб		АПО	1,14	∞	0,00	45,90	46,72	27,09	13,69
Метод трикутника			0,57	∞	0,00	25,77	63,79	18,33	14,60
Метод З-Н			1,78	∞	0,00	83,71	35,93	69,26	17,04
Метод CHR			0,53	∞	0,00	15,47	65,15	18,28	12,97
Запропонований спосіб	ПД-регулятор	Колона синтезу	1,62	187,95	0,00	0,00	0,00	959,79	124,97
Метод трикутника			0,29	135,56	0,00	40,09	0,00	2564,73	247,94
Метод З-Н			3,71	60,28	0,00	53,47	0,00	895,26	122,30
Метод CHR			1,44	56,36	0,00	55,50	0,00	1709,88	176,51
Запропонований спосіб		АПО	0,66	7,57	0,00	0,00	0,00	32,45	5,24
Метод трикутника			0,68	6,07	0,00	5,66	0,00	24,05	5,01
Метод З-Н			1,60	6,24	0,00	37,87	0,00	60,54	5,66
Метод CHR			0,62	5,84	0,00	8,46	0,00	24,53	5,11
Запропонований спосіб	ПДД-регулятор	Колона синтезу	3,07	85,01	95,58	0,00	0,00	219,48	73,98
Метод трикутника			0,20	135,56	30,12	39,12	0,00	2805,33	241,60
Метод З-Н			4,95	27,40	167,68	33,43	0,00	372,91	80,15
Метод CHR			2,47	27,40	83,84	54,81	0,00	1598,62	129,71
Запропонований спосіб		АПО	0,68	5,88	0,89	0,48	0,00	15,78	4,30
Метод трикутника			0,47	6,07	1,35	5,64	0,00	31,55	4,61
Метод З-Н			2,14	2,84	3,25	60,73	0,00	30,37	4,62
Метод CHR			1,07	2,84	1,62	14,14	0,00	23,71	3,48

**Порівняльна таблиця якості роботи систем
автоматичного регулювання для ОК коливального характеру**

Метод знаходження налаштувань регулятора	Закон регулювання	ОК	Налаштування регулятора			Показники якості регулювання			
			Kp	Ti	Td	σ	$\Delta_{ст}$	Tp	J
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Запропонований спосіб	П-регулятор	Компресор	1,01	∞	0,00	66,44	49,76	119,00	55,61
Метод трикутника			0,60	∞	0,00	42,74	62,56	81,22	51,60
Метод З-Н			1,76	∞	0,00	106,29	36,21	5500,00	760,42
Метод CHR			0,53	∞	0,00	38,77	65,42	53,08	47,23
Запропонований спосіб		Сепаратор	1,01	∞	0,00	56,43	49,78	57,73	22,97
Метод трикутника			0,61	∞	0,00	33,14	62,08	31,33	16,06
Метод З-Н			1,72	∞	0,00	87,54	36,79	150,81	33,01
Метод CHR			0,52	∞	0,00	28,61	65,99	31,57	19,88
Запропонований спосіб	ПД-регулятор	Компресор	0,30	25,35	0,00	0,00	0,00	102,45	15,46
Метод трикутника			0,72	12,60	0,00	24,94	0,00	116,58	11,73
Метод З-Н			1,59	13,11	0,00	Процес нестійкий			
Метод CHR			0,62	12,26	0,00	24,98	0,00	125,07	11,82
Запропонований спосіб		Сепаратор	0,34	13,76	0,00	0,00	0,00	56,72	8,34
Метод трикутника			0,73	7,02	0,00	16,96	0,00	51,79	5,88
Метод З-Н			1,55	7,49	0,00	42,97	0,00	180,33	9,69
Метод CHR			0,60	7,01	0,00	15,95	0,00	46,83	6,07
Запропонований спосіб	ПДД-регулятор	Компресор	0,56	10,82	3,23	2,31	0,00	47,88	8,14
Метод трикутника			0,50	12,60	2,80	1,07	0,00	34,37	8,89
Метод З-Н			2,11	5,96	6,66	71,93	0,00	200,23	16,42
Метод CHR			1,06	5,96	3,33	38,71	0,00	71,03	8,71
Запропонований спосіб		Сепаратор	0,64	5,88	1,90	1,99	0,00	26,18	4,37
Метод трикутника			0,51	7,02	1,56	1,85	0,00	28,89	4,94
Метод З-Н			2,06	3,41	3,62	45,87	0,00	38,54	4,37
Метод CHR			1,03	3,41	1,81	26,97	0,00	31,62	4,20

Основним параметром процесу, який впливає на режим роботи колони, є витрата циркуляційного газу (навантаження на агрегат). У разі зміни навантаження колона синтезу перейде в новий стан рівноваги технологічних параметрів. При цьому модель буде потребувати адаптації за раніше наведеним алгоритмом.

Спрощену функціональну схему колони синтезу метанолу надано на рис. 13. Технологічна інформація від датчиків температури, витрати, тиску й концентрації потрапляє в блок керування. У блоці керування за наведеним раніше алгоритмом розв'язується оптимізаційна задача. Практично систему керування з моделлю колоною синтезу метанолу реалізовано в SCADA системі TraceMode 6. Математична модель колони синтезу метанолу реалізована за допомогою FBD діаграм. Адаптація математичної моделі й пошук оптимального розв'язку реалізовані в програмному пакеті Maple 14.

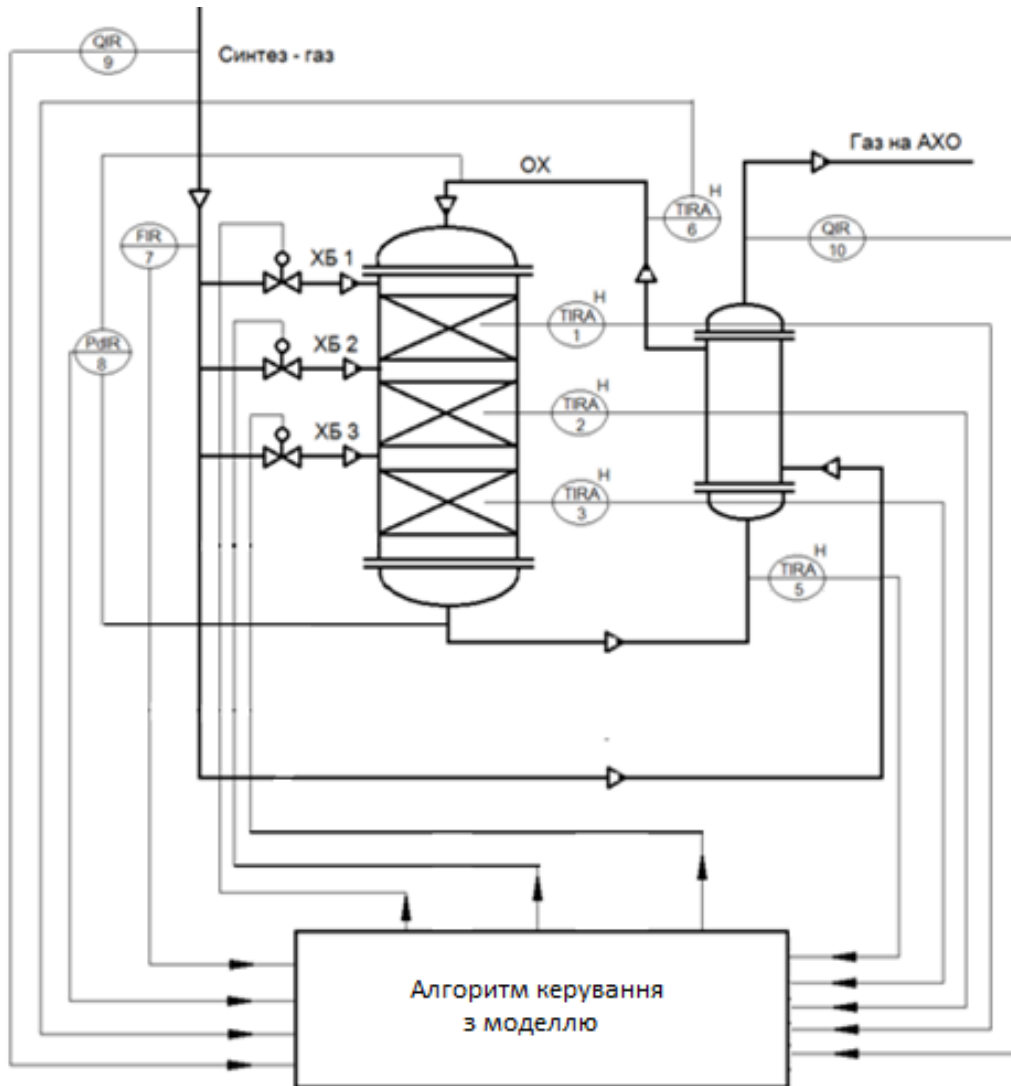


Рис. 13. Система керування з моделлю колоною синтезу метанолу

У роботі було змодельовано режими навантаження від 60% до 100% із кроком 5%. При цьому значення збурюючих параметрів було взято такими, які вони є в реальному об'єкті при цих же навантаженнях. У результаті досліджен-

ня було отримано залежності, що наведено на рис. 14. З аналізу графіків випливає, що впровадження системи керування з моделлю дозволить підвищити концентрацію метанолу на виході колони синтезу метанолу на $\sim 1\%$ (абсолютн.), тобто збільшити концентрацію метанолу з 5% до 6%. У натуральному виразі за 1 рік роботи це дозволить одержати додатково від 6 до 8 тис. тон метанолу.

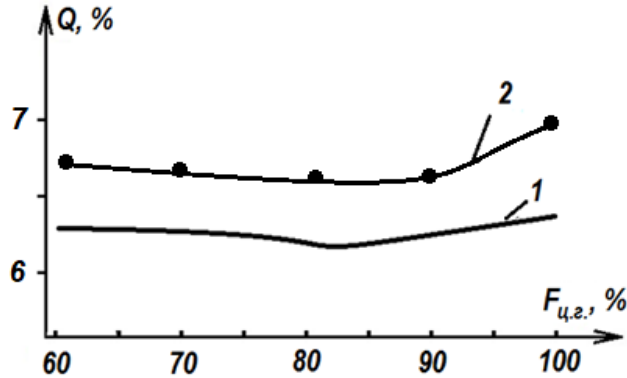


Рис. 14. Залежність концентрації метанолу на виході колони синтезу: 1 – керування колоною за рекомендаціями регламенту; 2 – керування колоною системою з моделлю

Запропонована система керування дозволить забезпечити максимальний ступінь перетворення синтез-газу в метанол за один прохід через колону при різних навантаженнях на агрегат з урахуванням зміни властивостей каталізатора й інших параметрів технологічного процесу. Позитивною особливістю даної системи є те, що вона не потребує додаткових капіталовкладень і дозволяє працювати з тими вимірювальними каналами, які вже реалізовані на діючому виробництві.

Реалізовано дискретну систему керування блоком охолодження і конденсації метанолу у виробництві метанолу з моделлю та апробовано її роботу на комп'ютерних імітаторах. Фрагмент таблиці, що ілюструє роботу запропонованої дискретної системи керування вузлом охолодження і конденсації з моделлю, наведений в табл. 3.

Таблиця 3

Значення температури газометанольної суміші на виході апаратів повітряного охолодження

Номер комбінації	Потужність								Твих	ΣN
	Вентилятор 1		Вентилятор 2		Вентилятор 3		Вентилятор 4			
	2/3N	1/3N	2/3N	1/3N	2/3N	1/3N	2/3N	1/3N		
238	1	1	1	0	1	1	1	0	61	3 1/3N
239	1	1	1	0	1	1	1	1	60	3 2/3N
246	1	1	1	1	0	1	1	0	61	3N
247	1	1	1	1	0	1	1	1	60	3 1/3N
248	1	1	1	1	1	0	0	0	61	2 2/3N
249	1	1	1	1	1	0	0	1	60	3N
250	1	1	1	1	1	0	1	0	59	3 1/3N
252	1	1	1	1	1	1	0	0	59	3N

Примітка. N – потужність одного вентилятора

Під час розрахунку роботи системи керування вузлом охолодження та конденсації вважають, що кожен з вентиляторів може бути включеним на $1/3$, $2/3$ або на повну потужність. У дисертації проаналізовано роботу системи дискретного керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації в різних температурних умовах. Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити висновок, що в середньому ефект від упровадження даної системи становить від N до $2N$ кВт. Для наближеного економічного розрахунку обрано, що ефект від упровадження дискретної системи керування з моделлю становить N кВт. Час безперервної роботи агрегату в «теплий» період року становить близько 5000 годин/рік. Ураховуючи, що потужність одного вентилятора 100 кВт, за один рік економія буде приблизно 500 000 кВт/рік. За середньої вартості електроенергії для промислових виробництв 2 грн/кВт (станом 2017–2018 рік) економічний ефект від впровадження дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації метанолу у виробництві метанолу становить ~ 1 млн грн./рік. Крім того, запропонована дискретна система керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації дозволяє розраховувати значення коефіцієнта забрудненості поверхонь теплообміну АПО. За досягнення максимально допустимого значення цього коефіцієнта слід увімкнути систему самоочищення АПО. Це можна здійснити не зупиняючи стадію. Наприклад, обрати таку комбінацію, за якою вентилятор даної АПО не працює. Через систему зрошення слід подати миючий розчин. Після самоочищення система керування переходить у свій нормальний режим роботи. Це також дозволить отримати додаткову економію електричної енергії на охолодження та конденсацію газометанольної суміші.

ВИСНОВКИ

Одержані в дисертаційній роботі наукові та експериментальні результати створили необхідні та достатні умови для розв'язання науково-практичної проблеми – створення систем оптимального керування з моделлю стадією синтезу метанолу у виробництві метанолу, які дозволять підвищити ефективність цього виробництва.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Розроблено методологічні засади способів застосування математичних моделей для створення систем оптимального керування виробництвом метанолу, на підставі проведеного технологічного аудиту. З'ясовано у яких випадках доцільно використовувати експериментально-статистичні моделі, у яких детерміновані, у яких комбіновані. Розроблено сучасну класифікацію математичних моделей, що дозволило визначити пріоритетні шляхи їхнього використання для розв'язання задач оптимізації технологічних процесів через удосконалення роботи систем автоматичного регулювання.

2. Вперше запропоновано при апроксимації кривої перехідного процесу еквівалентного об'єкта керування перехідною характеристикою ланки 2-4 порядків в якості початкових даних використовувати координати точок глобального екстремуму (характерні точки) першої, другої, третьої або четвертої похідних перехідної характеристики ЕОК. Проведено дослідження залежності похибки апроксимації від ступеня динамічної ланки, якою замінюється реальний об'єкт керування. Зроблено висновок, що при розв'язанні інженерних задач цілком достатньо використовувати ланки другого порядку з запізненням.

3. Вперше виконано порівняльний аналіз запропонованого способу вибору початкових даних для апроксимації через характерні точки з рівномірним розподілом точок. Визначено залежність максимального відхилення реального перехідного процесу та апроксимованого ланкою другого порядку залежно від кількості точок. Зроблено висновок, що при використанні п'яти характерних точок похибка не перевищує 2% для коливального та 3% для аперіодичних процесів, що майже в 1,6 разів менш ніж за рівномірним розподілом точок. Використання характерних точок дозволяє в 3 рази зменшити кількість точок, що суттєво зменшує кількість обчислювань.

4. Вперше запропоновано метод пошуку оптимальних настроювань ПІД-регулятора, у якому як критерій оптимальності використано квадратичну функцію динамічної похибки систем автоматичного регулювання, а як перехідну характеристику еквівалентного об'єкта керування – перехідну характеристику ланки другого порядку, апроксимовану через характерні точки. Обґрунтовано вибір методу розв'язання оптимізаційної задачі для П-, ПІ-, ПІД-регуляторів.

5. Проведено порівняльний аналіз запропонованого в роботі методу знаходження оптимальних настроювань ПІД-регулятора з найбільш поширеними в інженерній практиці методами: методом Зіглера-Нікольса, методом трикутника, що дозволило зробити висновок про ефективність розробленого методу, адже показники якості перехідного процесу покращено від 1,6 до 3 разів.

6. Розроблено комбіновану математичну модель з концентрації метанолу на виході триполичної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, яка має 4-й порядок. Це дозволило отримати зворотне рівняння у вигляді постійного функціоналу, в якому при зміні технологічних параметрів будуть змінюватися тільки коефіцієнти. Це рівняння обрано як критеріальне рівняння при розв'язанні оптимізаційної задачі.

7. Вперше на підставі розробленої комбінованої математичної моделі колони синтезу метанолу у виробництві метанолу розроблено алгоритм роботи та створено систему керування з моделлю багатополичної колони синтезу метанолу, що дозволило не використовуючи додаткові засоби збільшити концентрацію метанолу на виході колони синтезу на 1% (абсолютний).

8. Обґрунтовано можливість застосування дискретної системи керування з моделлю для керування вузлом охолодження та конденсації. Розроблено мате-

матичну модель апаратів повітряного охолодження для всіх режимів роботи, що враховує ступінь забруднення поверхонь теплообміну. Це дозволило обчислити ступень забруднення поверхонь теплообміну та запропонувати систему очищення, яка вмикається при досягненні коефіцієнтом відповідного значення.

9. Розроблено алгоритм роботи та створено систему керування блоком охолодження та конденсації у виробництві метанолу, що враховує прогноз погоди, зміну навантаження тощо. Це дозволило стабілізувати роботу циклу синтезу та зменшити витрати електроенергії на охолодження і конденсацію метанолу до ~ 1 млн. грн./рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем керування технологічними об'єктами : монографія / М. Г. Лорія, О. В. Поркуян, М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев [за ред. М. Г. Лорія]. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 192 с.

Статті у фахових виданнях

2. Физико-химические основы фотоавтокаталитического процесса окисления метана в метанол / А. Б. Целищев, О. И. Захарова, М. Г. Лория, И. И. Захаров // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 4. – С. 43–55.

3. Установка для проведення прямої конверсії метану в метанол фотоавтокаталітичним методом / А. В. Філончук, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія, І. І. Захаров // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 6(148). – С. 23–26.

4. Установка для оптимізації параметрів фотоавтокаталітичного процесу прямої конверсії метану в метанол / [А. В. Філончук, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія, І. І. Захаров] // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 7(154), Ч. 2. – С. 80–85.

5. Ананьєв М. В. Оптимальне настроювання регулятора за квадратичною оптимізаційною функцією / М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 6(148). – Ч. 2. – С. 134–141.

6. Ананьєв М. В. Ідентифікація об'єктів керування / М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнародний науково-технічний журнал. – Хмельницький, 2010. – № 2(36). – С. 178–181.

7. Дослідження впливу вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на роботу циклу синтезу метанолу / С. О. Вітковський, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія, П. Й. Єлісеєв // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 7(154), Ч. 2. – С. 95–99.

8. Апроксимація перехідної функції об'єкта керування ланкою другого порядку / М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія та ін. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнародний науково-технічний журнал. – Хмельницький. – 2011. – № 2. – С. 209–213.

9. Ідентифікація параметрів моделі з використанням точок глобальних екстремумів динамічних характеристик / М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск, 2012. – № 5. – С. 188–191.
10. Система екстремального керування багатополощним реактором з моделлю / Д. Абдалхамід, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев, П. Й. Єлісеєв // Вісник СХУ ім. В. Даля. – № 15(186), Ч. 2. – 2012. – С. 152–156.
11. Абдалхамід Д. Динамічна модель газового реактора / Д. Абдалхамід, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 4. – С. 31–35.
12. Адаптація математичної моделі реактора синтезу метанолу / Д. Абдалхамід, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев та ін. // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2013. – № 6/3(66). – С. 4–6.
13. Аналіз ефективності способу налаштування регуляторів з використанням квадратичної оптимізаційної функції / М. В. Ананьєв, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнародний науково-технічний журнал: Хмельницький. – 2013. – № 2. – С. 172–177.
14. Разработка комбинированной модели для задач оптимизации / Д. Абдалхамид, М. Г. Лория, П. Й. Елисеев, А. Б. Целищев // Наука и техника (международный научно-технический журнал). – Мн.: БНТУ, 2014. – № 3. – С. 209–213.
15. Абдалхамід Д. Освоєння виробничого резерву шляхом оптимізації колони синтезу метанолу / М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев, Д. Абдалхамід // Технічний аудит і резерв виробництва. – 2014. – № 5. – С. 188–191.
16. Abdulhamid D. Algorithm of optimal solution search for the control with model system of methanol synthesis column / D. Abdulhamid, M. G. Loriya, A. B. Tselischev and other // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2014. – № 9(216), Ч. 2.– С. 55–58.
17. Розробка системи моніторингу для лабораторної установки фотокаталітичної конверсії метану в метанол / Д. Д. Шаповалов, М. І. Усов, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2014. – №10 (217). – С. 147–151.
18. Loria M. G. Identification algorithm of control objects / M. G. Loria // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2018. – №6 (247), Ч. 2. – С. 86–90.
19. Лорія М. Г. Розробка математичної моделі газового реактора для оптимізації технологічного процесу / М. Г. Лорія // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2018. – № 1(242), Ч. 1. – С. 179–183.
20. Лорія М. Г. Комбінована математична модель триполичного газового реактора у виробництві аміаку / М. Г. Лорія // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019 – № 2(143) – С. 15–20.
21. Лорія М. Г. Знаходження шляхів забезпечення максимальної ефективності роботи колони синтезу метанолу / М. Г. Лорія // Вісник Донбаської державної металургійної академії. – 2019. – № 2. – С. 43–50.
22. Loria M. Research of the of identification algorithm of control object of second-order links with a delay time / M. Loria // Technology audit and production reserves. – 2019. – № 1/2(45). – p. 35–43.

23. Оптимальне керування вузлом охолодження і конденсації газопродуктової суміші у виробництві синтезу метанолу / М. Г. Лорія, О. В. Поркуян, О. Б. Целіщев, П. Й. Єлісеєв // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2019. – № 2(250)– С. 54–59.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

24. Autocatalytic Photo-Oxidation Process of C3-C4 Fraction to Methanol / [M. G. Loriya, A. A. Ijagbuji, A. B. Tselishev, I. I. Zakharov] // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 660. – P. 51–56.

25. Zakharov I. I. The new pathway for methanol synthesis: Generation of methyl radicals from alkanes / I. I. Zakharov, A. A. Ijagbuji, A. B. Tselishev and other // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2015. – № 3. – P. 405–412.

26. Asmankina A. Research and development of a stepped heat pump unit with a hydrodynamic cavitation device in systems complex / A. Asmankina, S. Korolevsky, M. Loria and other // EUREKA: Physics and Engineering. – 2017. – № 6. – P. 62– 68.

27. Mathematical and simulation modeling of thermal processes in pyroelectric detectors / [A. Bondarenko, P. Yeliseev, M. Loriya, A. Tselishchev] // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2017. – Vol. 17. – № 2. – P. 35–38.

28. Synthesis of methanol from methane in cavitation field / [O. Tselishchev, A. Ijagbuji, M. Loria, V. Nosach] // Chemistry & Chemical Technology. – 2018. – Vol. 12, № 1. – P. 69–73.

29. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings / M. Loria // EURIKA: Physics and Engineering. – 2019. – № 2. – P. 16–22.

30. Model-based control system of methanol synthesis column. Algorithm development / M. Loria, O. Porkuan, D. Kulikov, O. Tselishchev // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2019. – № 2. – p. 16–22.

Патенти

31. Пат. 59190А Україна МКВ С07С31/02, С07С31/04, С07С29/48. Спосіб отримання метанолу та інших алифатичних спиртів / В. В. Мілоцький, О. Б. Целіщев, М. Г. Лорія; Заявл. 10.07.03. Опубл. 15.08.2003. Бюл. 8.

32. Пат. 2265585 РФ МКВ В01J12/00, С07С5/02, С07С6/00. Спосіб получения метанола и других алифатических спиртов / В. В. Милоцкий, А. Б. Целищев, М. Г. Лория; Заявл. 10.07.03; Опубл. 10.12.2005. Бюл. 34.

33. Пат. 56683 Україна МКВ С07С31/04, С07С31/00. Фотохімічний спосіб отримання метанолу з вуглеводневої сировини у присутності пари нітратної кислоти / О. Б. Целіщев, І. І. Захаров, М. Г. Лорія; Заявл. 21.06.10. Опубл. 25.01.2011. Бюл. 2.

34. Пат. 104812 Україна С07С31/00 Спосіб отримання метанолу та інших кисеньмісних сполук / О. Б. Целіщев, М. В. Кошовець, В. О. Носач та ін.; Заявл. 25.06.10. Опубл. 25.02.2011. Бюл. 4.

35. Пат. 93478 Україна МКВ С07С29/50. Спосіб одержання метанолу / О. Д. Тюльпінов, А. А. Іджагбуджі, Д. О. Тюльпінов, Р. М. Федотов, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев; Заявл. 23. 12. 13; Опубл. 10.10.2014. Бюл. 19.

36. Пат. 77800 Україна МПК (2013.01) G05D 19/00. Спосіб знаходження оптимальних налаштувань регуляторів / М. В. Ананьєв, О. Б. Целищев, М. Г. Лорія, П. Й. Єлісеєв, Ю. В. Павленко. Заявл. 03.09.2012. опубл. 25.02.2013. Бюл. №4.

Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях

37. Физико-химические основы процесса конверсии метана в метанол в «мягких» условиях / [А. Б. Целищев, О. И. Захарова, М. Г. Лория, И. И. Захаров] / International Conference «Modern problems of physical chemistry» 14–16 september 2009. – Donetsk. – P. 106–107.

38. Исследование механизма реакций фото - автокаталитического процесса окисления метана в метанол / [А. В. Филончук, А. Б. Целищев, М. Г. Лория, И. И. Захаров] / Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технологія 2010» 22–23 квітня 2010 р. – Сєверодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. – Ч. II. – С. 65–68.

39. Энергосберегающая технология получения метанола / И. И. Захаров, А. Б. Целищев, О. И. Захарова, М. Г. Лория / VII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» June 4–11 2010. – Varna, Bulgaria, International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number. – 2010. – Vol. 3. – P. 226–230.

40. Дослідження механізму реакцій окиснення метану в метанол фотоавтокаталітичним методом / [А. В. Філончук, І. І. Захаров, О. Б. Целищев, М. Г. Лорія] / Матеріали I Української конференції «Реакції окиснення. Наука і технології» 6–8 вересня 2010 р. – Рубіжне, 2010. – С. 70–72.

41. Квантово-химическое исследование механизма фото - автокаталитического процесса окисления метана в метанол / А. Б. Целищев, И. И. Захаров, О. И. Захарова, М. Г. Лория // Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії та технології і сталий розвиток» 12–15 травня 2010 р. – К., 2010. – С. 30–32.

42. Новая биотехнология: «прямая» конверсия метана в метанол // А. В. Филончук, Е. Ю. Черноусов, А. Б. Целищев, И. И. Захаров // XXII симпозиум «Современная химическая физика» 24 сентября – 5 октября 2010 г. – Туапсе. – С. 56.

43. Фотоавтокаталітичне окиснення пропан-бутанової фракції в метанол / М. Г. Лорія, І. І. Захаров, О. Б. Целищев [та ін.] // ВНТУ III з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2011). – 21–24 вересня 2011. Збірник наукових статей. – 2011. – Т. 2. – С. 348–350.

44. Исследование фото - автокаталитического процесса окисления пропан-бутановой фракции в метанол: лабораторная установка // А. В. Филончук, А. Б. Целищев, М. Г. Лория, И. И. Захаров // Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технологія 2011» 22–23 квітня 2011 р. – Сєверодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – Ч. I. – С. 90–91.

45. Захаров І. І. Прямє перетворення пропан-бутанового газу в метанол / І. І. Захаров, М. Г. Лорія, О. Б. Целищев / VII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» June 3–10 2011. – Varna, Bulgaria, International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number. – 2011. – Vol. 3. – P. 103–105.

46. Черноусов С. Ю. Новітня технологія одержання метанолу // С. Ю. Черноусов, М. Г. Лорія, О. Б. Целищев // Перша науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» 25–26 жовтня 2011 р. – Северодонецьк, 2011. – С. 120–122.

47. Loriya M. G. Methanol receiving by photo-autocatalytic oxidation by processing of fraction C3–C4 / M. G. Loriya, A. B. Tselishev / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Технологія 2012» 6–7 квітня 2012 р. – Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – Ч. I. – С. 53–54.

48. Абдалхамид Д. Система экстремального управления многополочным реактором с моделью / Д. Абдалхамид, М.Г. Лорія, А.Б. Целищев // Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем 2013. Матеріали Другої Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Северодонецьк: ТІ СНУ ім. В. Даля, 2012. – С. 115–117.

49. Tselishev A. B. Modelling of chemical reactions and new technologies for industrially important processes // A. B. Tselishev, M. G. Loriya, I. I. Zakharov // VI International Conference «Modern problems of physical chemistry» 9–12 september 2013. – Donetsk. – P. 260–261.

50. Абдалхамид Д. Моделирование сложных технологических объектов / Д. Абдалхамид, М. Лорія // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції 3–8 червня 2013. – С. 103–104.

51. Абдалхамид Д. Применение комбинированного моделирования для оптимизации сложных объектов / Д. Абдалхамид, М. Г. Лорія, П. Й. Елисеев [и др.] // Технологія - 2013. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Северодонецьк: ТІ СНУ ім. В. Даля, 2014. – С. 80–82.

52. Абдалхамид Д. Математическая модель реактора синтеза метанола / Д. Абдалхамид, М. Г. Лорія // Електронні апарати та системи. Проблеми створення. Перспективи розвитку. 2015. Матеріали П'ятої Всеукраїнської науково - практичної конференції. – Северодонецьк: ТІ СНУ ім. В. Даля, 2015. – С. 135–137.

53. Абдалхамид Д. Система управления многополочным реактором / Д. Абдалхамид, М. Г. Лорія // Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем 2011. Матеріали Першої Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Северодонецьк: ТІ СНУ ім. В. Даля, 2011. – С. 139–140.

54. Поиск оптимальных настроечных параметров регулятора с использованием квадратичной оптимизационной функции / М. В. Ананьев, А. Б. Целищев, М. Г. Лорія [и др.] // Совершенствование систем автоматизации технологических процессов: международная научно-техническая конференция, 24–25 мая 2010 г. – Мн.: БНТУ, 2010. – С. 49.

55. Анализ эффективности способа настройки регуляторов на примере колебательных объектов управления / М. В. Ананьев, А. Б. Целищев, М. Г. Лорія и др. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: XII міжнародна науково-технічна конференція, 3–8 червня 2013. – Одеса, 2013. – С. 136–137.

АНОТАЦІЯ

Лорія М. Г. Методологічні засади математичного моделювання та оптимального керування виробництвом метанолу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України, Сєвєродонецьк, 2019.

Дисертацію присвячено дослідженню методологічних засад застосування математичних моделей технологічних об'єктів виробництва метанолу для побудови системи оптимального керування. Запропоновано сучасну класифікацію математичних моделей, що дозволило визначити пріоритетні шляхи їхнього використання для розв'язання задач оптимізації технологічних процесів через вдосконалення роботи систем автоматичного регулювання. Проведено ідентифікацію кривих розгону еквівалентних об'єктів керування перехідною характеристикою ланки 2–4 порядку через характерні точки, які визначаються як екстремуми похідних кривої розгону об'єкта керування, що дозволило зменшити похибку апроксимації до 2% в порівнянні з апроксимацією рівномірним розподілом точок. Дістало подальшого розвитку використання квадратичної оптимізаційної функції для отримання оптимальних налаштувань ПД-регулятора, шляхом використання ідентифікованих через ХТ математичних моделей еквівалентних об'єктів керування, що дозволило покращити динамічні показники систем автоматичного регулювання. Вдосконалено метод пошуку глобального екстремуму полімодальної функції шляхом визначення початкових координат пошуку екстремуму як екстремум запропонованої оптимізаційної функції, що дозволило зменшити кількість кроків до досягнення глобального екстремуму. Розроблено структурну інформаційну схему багатополічної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, що дозволило врахувати складні внутрішні взаємозв'язки та запропонувати алгоритм оптимального керування з моделлю. Розроблено комбіновану математичну модель багатополічної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, яка має порядок не більше 4-го, що допомогло достатньо легко знайти зворотну модель та визначити значення поточних витрат синтез-газу по ХБ колони для досягнення максимальної концентрації цільового компонента на виході колони. Запропоновано алгоритм роботи системи керування з моделлю багатополічної колони синтезу метанолу у виробництві метанолу, який включає блок адаптації математичної моделі колони, що дозволило підтримувати адекватність математичної моделі в широкому діапазоні зміни параметрів. Для керування послідовно з'єднаними повітряними теплообмінниками запропоновано систему дискретного регулювання з моделлю, яка враховує динамічну зміну коефіцієнту забруднення поверхні теплообмінника, що дозволило підвищити ефективність роботи вузла охолодження та конденсації.

Ключові слова: виробництво метанолу, виробничий резерв, об'єкт керування, динамічні характеристики, крива розгону, апроксимація, характерні точки, ідентифікація, перехідний процес, динамічна ланка 2-го порядку, динамічна похибка, оптимізація, система автоматичного керування, ПД-регулятор, критерій оптимальності, ко-

лона синтезу, апарат повітряного охолодження, алгоритм, система керування з моделлю, розподілена система.

ANNOTATION

Loriya M.G. Methodological foundations of mathematical modeling and optimal control of methanol production. - Manuscript.

Dissertation for obtaining PhD in Technical Sciences in speciality 05.13.07 – automation of control processes. – Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodoneck, 2019.

The dissertation is devoted to the study of methodological foundations of the application of mathematical models of methanol production technological objects for the formation of optimal control system. A modern classification of mathematical models is proposed, which allowed determining the priority ways of using them for solving technological processes optimization problems by improving Automatic Control System (ACS) operation. It is proposed to identify the acceleration curves of equivalent control objects of 2-4 order transient response through characteristic points, which are defined as extremes of the derivatives of control object acceleration curve, which reduced the approximation error to 2% compared with the approximation by uniform distribution of points. Further development of the use of quadratic optimization function for obtaining optimal settings of PID controller is obtained, using identified through CP mathematical models of equivalent control objects, which allowed improving ACS dynamic parameters. The method of global extreme search of a polymodal function is improved by determining the initial coordinates of extreme search as an extreme of the proposed optimization function, which reduced the number of steps to reach the global extreme. The structural information scheme of multi-shelf methanol synthesis column in methanol production is developed, which allowed taking into account the complex interconnections and suggesting model-based optimal control algorithm. A combined mathematical model of a multi-shelf methanol synthesis column in methanol production, which is of not more than 4th order, is developed, which made it relatively easy to find the reverse model and to determine the values of current synthesis gas consumption by column CB in order to achieve the maximum concentration of the target component at column output. The model-based operation algorithm of control system of multi-shelf methanol synthesis column in methanol production is proposed, which includes an adaptation unit of column mathematical model, which allowed maintaining the mathematical model adequacy in a wide range of parameter change. For the control of series-connected air heat exchangers, a model-based discontinuous control system is proposed, which takes into account the dynamic change in the fouling factor of heat exchanger surface, which allowed improving the efficiency of cooling and condensation unit.

Keywords: methanol production, production reserve, control object, dynamic characteristics, acceleration curve, approximation, characteristic points, identification, transition process, second-order dynamic link, dynamic error, optimization, automatic control system, PID-regulator, criterion of optimality, synthesis column, air cooling apparatus, algorithm, model control system, distributed system.

Підписано до друку 14.08.2019. Формат 60x90/16.
Обсяг 1,9 д.а. Тираж 100 екземплярів. Замовлення № 23(2019).
