

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

УДК 681.52:62-503.57



ЛЕВІНСЬКИЙ МАКСИМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

**АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ:
АЛГОРИТМИ ПАСИВНОГО САМОНАЛАГОДЖЕННЯ
КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕДАЧІ РЕГУЛЯТОРІВ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ –2018

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Хобін Віктор Андрійович,
Одеська національна академія
харчових технологій,
м. Одеса,
завідувач кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
м. Кропивницький,
завідувач кафедри автоматизації
виробничих процесів

доктор технічних наук, професор
Балюта Сергій Миколайович,
Національний університет харчових технологій,
м. Київ,
завідувач кафедри електропостачання і
енергоменеджменту

Захист відбудеться « 26 » червня 2018 р. о 13⁰⁰ годині в аудиторії А-311
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 у Національному
університеті харчових технологій за адресою: вул. Володимирська, 68, м.
Київ, 01601.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного
університету харчових технологій (вул. Володимирська, 68, м. Київ).

Автореферат розісланий « 25 » травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к.т.н., доцент



Л.О. Власенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективність технологічних процесів залежить у тому числі і від якості керування ними в автоматичному режимі. Як об'єкти регулювання (ОР), усі вони відрізняються змінністю властивостей, яка знаходить висвітлення в змінах параметрів їх математичних моделей. Повною мірою це стосується процесів у харчовій і зернопереробній галузях, де в широких діапазонах змінюються характеристики сировинних і енергетичних потоків, стан робочих органів і активних зон технологічних агрегатів. Тому об'єкти технологічного типу часто відрізняються нелінійністю статичної характеристики по каналах керування і змінністю параметрів динамічних характеристик. Системи автоматичного регулювання (САР) з постійними налаштуваннями регуляторів виявляються працездатними тільки в порівняно вузькому діапазоні зміни навантажень. Отже, самоналагодження регуляторів є безальтернативним інструментом збереження прийнятого компромісу між показниками якості і стійкістю процесів у САР такими об'єктами. Однак самоналагодження за рахунок подачі на систему керування штучних тестових сигналів, перевід її в розімкнутий режим або на межу стійкості часто неприйнятне, тому що виникає ризик порушень регламентів технологічного процесу. Тому розробка алгоритмів самоналагодження параметрів регулятора САР, заснованих на пасивній ідентифікації змінних властивостей об'єкта технологічного типу без змін режимів функціонування САР, є актуальною науковою задачею. Її вирішення дозволить експлуатувати ОР в ефективних режимах при різних навантаженнях залежно від програми виробництва.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій в рамках напрямку наукової діяльності «Створення нового високоефективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв» по темі «Автоматичне керування технологічними процесами: розробка алгоритмів з високим рівнем інтелекту, моделювання та оптимізація систем» держбюджетної тематики кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем. Окремі питання розроблені в рамках госпдоговірної роботи 15/16 «Надати науково-технічну допомогу з модернізації алгоритмічного та програмного забезпечення АРМ оператора випарної станції».

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження – підвищення ефективності функціонування ОР технологічного типу зі змінними в широких діапазонах коефіцієнтами передачі за рахунок вдосконалення алгоритмів самоналагодження САР, яке виконується на основі пасивної ідентифікації моделі ОР.

Задачі дослідження, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:

- 1) провести аналіз існуючих концепцій побудови систем самоналагодження з активною і пасивною ідентифікацією моделі ОР, виявити переваги і недоліки відомих систем самоналагодження;
- 2) обґрунтувати властивості математичної моделі тестового ОР

технологічного типу і розробити базову імітаційну модель САР із самоналагодженням (САРС) для проведення комплексу комп'ютерних експериментів по вирішенню сформульованих нижче задач;

3) провести комп'ютерні експерименти по порівняльному аналізу якості виділення складової власного руху САР варіантами лінійних смугових фільтрів, обґрунтувати вибір їх доцільних порядків і параметрів;

4) провести дослідження відомої самоналагоджувальної системи, визначити її недоліки і шляхи вдосконалення, розробити САРС базової структури, провести її параметричну оптимізацію та комп'ютерні експерименти, які підтверджують ефективність системи і робастність до зміни спектрального складу координатних збурень і шумів;

5) запропонувати варіанти корекції алгоритмів керування контурів регулювання і самоналагодження САРС для підвищення динамічної точності і робастності до змінних запізнення та інерційності ОР, провести комп'ютерні експерименти, що підтверджують їх ефективність;

6) доробити алгоритми самоналагодження САРС для пускових режимів ОР, забезпечивши за час пуску завершення процедури самоналагодження і зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій;

7) розробити в середовищі SIMATIC STEP 7 прикладне програмне забезпечення, яке реалізує алгоритми самоналагодження, і оформити його у вигляді функціонального блоку бібліотеки контролерів S7-300/S7-400;

8) розробити стенд для напівнатурного моделювання САРС із контролером S7-300 і імітаційною моделлю реального часу характерного тестового об'єкта технологічного типу, коефіцієнт передачі якого змінюється в широкому діапазоні, у ході експериментів на стенді верифікувати функціональний блок і перевірити ефективність алгоритмів самоналагодження.

Об'єкт дослідження – система автоматичного керування об'єктом технологічного типу.

Предмет дослідження – система автоматичного регулювання із самоналагодженням об'єктом технологічного типу з пасивною ідентифікацією його коефіцієнта передачі, який змінюється в широкому діапазоні.

Методи дослідження, використані для вирішення задач: функціонально-структурний аналіз задач керування (задача 1); теорія автоматичного керування та її підрозділи – теорія самоналагоджувальних систем і оптимального параметричного синтезу (задача 2 – 5); статистична теорія автоматичних систем (задача 3); теорія цифрових систем керування і чисельного рішення диференціальних рівнянь (задача 7); імітаційне моделювання систем керування; планування та проведення імітаційних і напівнатурних експериментів, обробка їх результатів (задача 2 – 7); програмно-технічний синтез керуючих систем на базі промислових контролерів (задача 7, 8).

Наукова новизна отриманих результатів:

одержала подальший розвиток концепція самоналагодження регулятора в замкнутій САР на основі пасивної ідентифікації об'єкта регулювання з виділенням із загального руху регульованих змінних об'єкта і його моделі складових їхнього власного руху, формування контуру самоналагодження, у

якому задача ідентифікації зводиться до задачі регулювання і забезпечується рівність оцінок імовірнісних характеристик регульованих змінних об'єкта і його моделі, *що дозволило* розв'язати задачі підвищення точності, швидкодії, стійкості і робастності цього контуру для об'єктів технологічного типу зі змінними в широкому діапазоні коефіцієнтами передачі;

уперше обґрунтований доцільний порядок диференціального рівняння лінійного смугового фільтра Баттерворта, *який дозволив* встановити обґрунтований компроміс між його складністю і точністю виділення складових власного руху регульованих змінних об'єкта і його моделі;

уперше розроблені:

- метод корекції контуру самоналагодження, який стабілізує на заданому рівні його коефіцієнт передачі за рахунок масштабування оцінок імовірнісних характеристик складових власного руху регульованих змінних об'єкта і його моделі, *що дозволило* забезпечити стійкість контуру у всьому діапазоні змін коефіцієнта передачі ОР;

- алгоритм корекції контуру самоналагодження, який формує оцінки імовірнісних характеристик складових власного руху регульованих змінних об'єкта і його моделі тільки за рахунок синфазних ділянок цих змінних, *що дозволило* підвищити робастність контуру самоналагодження до змін запізнення та інерційності ОР;

- алгоритм самоналагодження САРС для пускових режимів ОР, який зменшує інерційність контуру самоналагодження і збільшує його коефіцієнт передачі пропорційно швидкості зміни заданої змінної ОР у період пуску, *що дозволило* завершити початкову процедуру самоналагодження протягом цього періоду, знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій і забезпечити безударний перехід контурів регулювання і самоналагодження від пускового до сталого режиму функціонування;

- методика налаштування параметрів контуру самоналагодження САРС, *яка дозволила* провести їхній розрахунок по тим же вихідним даним, які традиційно використовуються для визначення параметрів регулятора звичайної САР;

удосконалені:

- структура контуру самоналагодження САРС за рахунок виведення з нього інерційних складових моделі ОР, смугового і усереднюючого фільтрів, *що дозволило* підвищити швидкодію контуру і точність самоналагодження коефіцієнта передачі регулятора САР до змінного коефіцієнта передачі ОР;

- алгоритм визначення оцінок імовірнісних характеристик, який лінеаризує контур самоналагодження, *що дозволило* розширити область його стійкості;

- алгоритми контурів регулювання і самоналагодження САРС за рахунок підвищення порядку астатизму їх регуляторів, *що дозволило* усунути сталі складові помилок регулювання, які пропорційні швидкості зміни коефіцієнта передачі ОР.

Практичне значення отриманих результатів

Створена в результаті теоретичних і експериментальних досліджень САРС забезпечує динамічну точність і стійкість при керуванні об'єктами технологічного типу, коефіцієнти передачі яких змінюються в широких діапазонах. Тому її доцільно використовувати в складі систем оптимізації для ефективного керування об'єктами даного типу як адаптивну систему стабілізації.

Для промислових контролерів SIMATIC S7-300/S7-400 розроблений програмний модуль, що реалізує функції блоку самоналагодження САРС, який можна включати до складу бібліотек їх програмного забезпечення. Модуль прийнятий до використання в розробках ТОВ «С-інжиніринг».

Результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій.

Особистий внесок здобувача

Основні результати дисертації отримані здобувачем самостійно. Стаття [2] написана особисто за матеріалами власних досліджень. У публікаціях по темі дисертації в співавторстві особистий внесок здобувача полягає в наступному: в [4] – виконані дослідження з оцінки ефективності фільтрації складових керованої змінної фільтрами різного порядку і визначені рекомендації з вибору порядку і параметрів фільтрів; в [5] – проведений оптимальний параметричний синтез САРС і виконана оцінка впливу змін спектрального складу координатних збурень і шумів на показники якості роботи системи; в [6] – запропоновані принципи підвищення ефективності контуру самоналагодження САРС і виконане імітаційне моделювання системи з метою їх перевірки; в [3] – виконані дослідження вільного і вимушеного руху нестационарної САР з різним порядком астатизму; в [1] – розроблено програмно-технічне забезпечення стенда для напівнатурного моделювання системи керування.

Апробація матеріалів дисертації

Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Автоматика – 2015» (м. Одеса, 2015 р.), «Автоматика – 2017» (м. Київ, 2017 р.), «Інформаційні технології та автоматизація» (м. Одеса, 2015, 2016, 2017), міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології-2017» (г. Київ, 2017).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані в 13 друкованих працях. Статей – 6, з яких 5 у наукових фахових виданнях України з Переліку, затвердженого МОН України, у тому числі 2 статті в журналі, який індексується в міжнародній наукометричній базі Web of Science; патентів на корисну модель – 1; тез доповідей – 6.

Структура та обсяг роботи

Дисертація складається із вступу, основної частини, яка включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг складає 243 сторінки. Основна частина – 177 сторінок, 99 рисунків і 14 таблиць

(14 сторінок зайняті повністю і 38 сторінок у сукупності), список використаних джерел з 108 найменувань на 11 сторінках, 9 додатків на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, показаний її зв'язок науковими програмами і темами, визначена мета і сформульовані задачі дослідження, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети, визначені об'єкт і предмет дослідження, перераховані методи дослідження, які використовувались для рішення задач, зазначена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок здобувача в публікації по темі дисертації, перераховані конференції, де проводилася апробація результатів, дана інформація про публікації, структуру і обсяг роботи.

У **першому розділі** відзначаються характерні риси технологічних процесів, як специфічного типу ОР, які відрізняють їх від інших типів. До них, насамперед, відносяться: фізична розподільність каналів керування; нелінійність фізичних процесів у технологічному агрегаті, регулюючому органі, виконавчому механізмі; високий рівень невизначеності причинно-наслідкових зв'язків між змінними; велика кількість незалежних один від одного факторів, які впливають на ОР, але практично недоступні для виміру, що проявляються як неконтрольовані координатні і параметричні збурення.

Параметричні збурення, а до них можна віднести і нелінійність статичних властивостей каналів регулювання, найбільш часто викликають зміни коефіцієнта передачі k_o ОР. Діапазон його зміни може досягати і навіть перевищувати значення десять. Динамічні параметри - час запізнення τ_o , постійна часу T_o , для класу ОР, який розглядається, при цьому змінюються не більше, ніж на 20%. Приклади таких ОР можна знайти у всіх галузях промисловості.

Для ОР, у яких коефіцієнт передачі $k_o(t)$ змінюється в широкому діапазоні, САР з типовими алгоритмами керування (ПІ, ПІД) при незмінних параметрах налаштування регулятора не в змозі забезпечити необхідних показників якості стабілізації керованої змінної $y(t)$ щодо заданого значення u^z . Якщо налаштування регулятора вибрати для найгіршої комбінації параметрів ОР, то при змінах керуючого впливу $u(t)$ у широкому діапазоні буде спостерігатися низька динамічна точність стабілізації. Якщо налаштування регулятора вибрати для певних початкових параметрів ОР, то в процесі роботи при зростанні $k_o(t)$ САР втрачає стійкість «у малому» і переходить у позиційний режим роботи. Дослідження, проведені фірмою Honeywell, показали, що з цієї причини на різних підприємствах порядку 49% - 63% контурів регулювання працюють із «слабкими» (близькими до розмикання) налаштуваннями регуляторів. Щоб зберегти компроміс між показниками якості і стійкістю процесів у САР такими ОР, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора. Т.ч., створення САРС для ОР технологічного типу зі змінним у широкому діапазоні коефіцієнтом передачі є актуальною науковою задачею.

У роботі проведена класифікація алгоритмів самоналагодження регуляторів по наступних ознаках: а) мета самоналагодження; б) характер вивчення властивостей САР або ОР у ході самоналагодження; в) використання математичних моделей САР або ОР в алгоритмах самоналагодження; г) характер інформації про процеси в САР, яка використовується для налаштування моделей САР або ОР.

Огляд концепцій побудови САРС виконаний по метериалам патентів, настанов до комерційних програмних продуктів, книг і статей. За результатами огляду виділено дві концепції самоналагодження: а) з активною ідентифікацією властивостей САР або ОР; б) з пасивною ідентифікацією властивостей САР. Перша припускає створення в системі специфічних форм руху змінних. При цьому підвищується ймовірність втрати стійкості САР, погіршується динамічна точність регулювання, регульована змінна може вийти за регламентні значення. Для цілого ряду ОР технологічного типу такі наслідки активних експериментів неприпустимі.

Методи пасивної ідентифікації властивостей САР не змінюють штатних режимів системи, а використовують інформацію про «природну» форму руху. Відповідно, вони вільні від вищеперерахованих недоліків. В дисертації дана концепція прийнята в якості базової для подальших досліджень. Передумови реалізації методів пасивної ідентифікації наступні: як показує практика, для розглянутих ОР технологічного типу спектральний склад параметричних збурень суттєво більш низькочастотний у порівнянні зі спектральним складом координатних збурень; у свою чергу, спектральний склад координатних збурень більш низькочастотний у порівнянні зі спектральним складом власного руху системи в замкнутому контурі. Завдяки цьому в складі регульованої змінної $y(t)$ можна виділити складову власного руху САР (її замкнутого контуру), яка проявляється у вигляді випадкових коливань середньої частоти $\tilde{y}(t)$ на тлі більш низькочастотних коливань $y_l(t)$, викликаних координатними збуреннями $f_k(t)$, і більш високочастотних коливань $y_n(t)$, викликаних шумами $f_n(t)$. Якщо за допомогою фільтра вдасться виділити складову власного руху $\tilde{y}(t)$ із загального руху регульованої змінної $y(t)$, то можна буде визначити оцінку дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}}(t)$ цієї складовій, яка пропорційна квадрату коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР.

У відомій з літературних джерел самоналагоджувальній системі (патент на корисну модель UA 36671 Україна, МПК²⁰⁰⁶ G05B13/02. Самоналагоджувальна система / В.А. Хобін, О.А. Марчук) у якості такого фільтра пропонується використовувати фільтр високої частоти (ФВЧ). Задача самоналагодження в даній системі зведена до задачі регулювання. Регулятор k_m контуру самоналагодження, змінюючи значення коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі ОР, яка включена в ланцюг його зворотного зв'язку за схемою упереджувача Сміта, встановлює приблизну рівність між оцінкою дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}_m}(t)$ змінної $\tilde{y}_m(t)$ на виході моделі ОР і оцінкою дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}}(t)$ складової власного руху $\tilde{y}(t)$ об'єкта, спрямовуючи помилку регулювання $\Delta\hat{D}(t)$ до нуля.

У результаті чого встановлюється приблизна рівність $k_m^2(t) \approx k_o^2(t)$. Завдяки змінам $k_m(t)$, зберігається стійкість контуру регулювання САРС при змінах коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР.

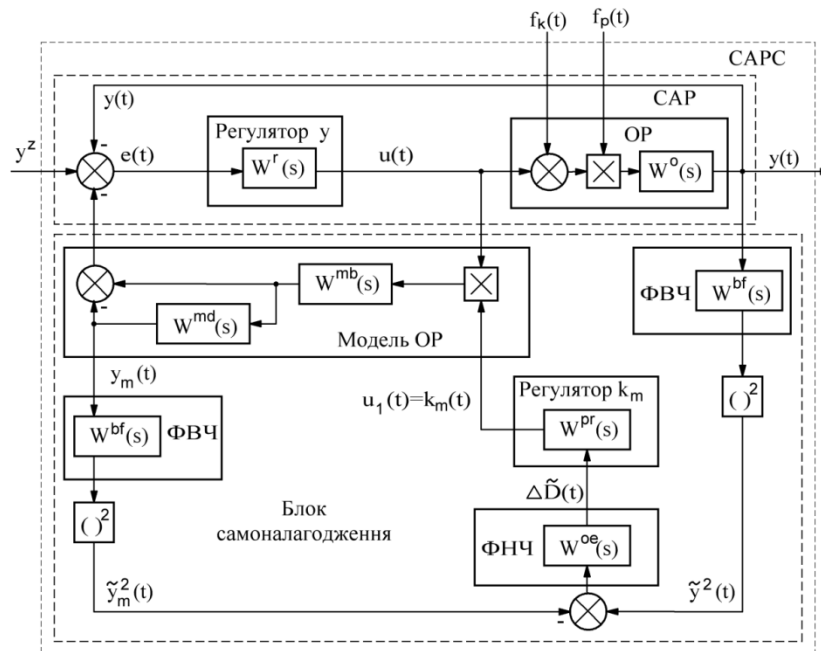


Рис. 1 Структурна схема САРС коефіцієнта передачі по патенту UA 36671, яка реалізує концепцію пасивної ідентифікації ОР с виділенням її власного руху

В роботі дана система розглядається як прототип для побудови більш досконалих САРС. Основна перевага таких систем полягає в тому, що режими функціонування САР при цьому не порушуються. Однак структура САРС складніша, ніж структура САР, тому що з'являється додатковий замкнутий контур самоналагодження. Взаємодія зворотного зв'язку по стану ОР і параметричного зворотному зв'язку в контурі самоналагодження обумовлює складний характер руху в САРС. Це визначає основний недолік таких систем – складно одночасно забезпечити точність і стійкість додаткового замкнутого контуру самоналагодження, який нелінійний по своїй природі і до складу якого, як правило, ще включаються нелінійні елементи (квадратори, блоки множення та ін.). Звідси логічно випливають мета і задачі дослідження, сформульовані раніше.

У **другому розділі** обґрунтований вибір методу дослідження САРС ОР технологічного типу. Використовувати для рішення задач аналізу і синтезу нестационарних і нелінійних систем аналітичні методи нераціонально, оскільки їх результати носять наближений характер і отримані для окремих приватних випадків. Тому в якості основного методу дослідження обране імітаційне моделювання системи в середовищі Simulink/Matlab шляхом проведення багатофакторних комп'ютерних експериментів (Matlab Individual Licenses 1-4 АЕ ДО 761327 ВД, #308918; Matlab R2017(9.2.0.538062), 64 bit (win64), February 23, 2017, License Number: Freeforall (student licence)). Отже, актуальної стає задача підготовки тестових САР у якості «об'єкта» для подальших досліджень. Вона передбачає мінімізацію числа параметрів моделі ОР (1) за рахунок

нормування щодо його часу запізнення τ_o і базового значення коефіцієнта передачі k_o^δ :

$$W^o(s) = \frac{k_o(t)}{T_o s + 1} \exp(-\tau_o s) \rightarrow \frac{\frac{k_o(t)}{\tau_o}}{\frac{T_o}{\tau_o} s + 1} \exp(-\frac{\tau_o}{\tau_o} s) = \frac{k_o^H(t)}{T_o^H s + 1} \exp(-\tau_o^H s). \quad (1)$$

В (1) початкове значення нормованого коефіцієнта передачі прийняте $k_o^H=1$, можливий діапазон його зміни становить $k_o^H(t^H) \in (0,5...10)$. Нормований час запізнення $\tau_o^H=1$, можливий діапазон його зміни $\tau_o^H \in (0,8...1,2)$. Значення нормованої постійної часу обране $T_o^H=2$ (s – оператор диференціювання). Для цих параметрів ОР визначені оптимальні параметри регулятора (2):

$$W^r(s) = k_r(t) \cdot (1 + 1/T_{iz} s) \rightarrow k_r(t) \cdot k_o^\delta \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{iz} s / \tau_o}\right) = k_r^H(t^H) \cdot (1 + 1/T_{iz}^H s). \quad (2)$$

– початкове значення нормованого коефіцієнта передачі $k_r^H=2,3$ і нормований час ізодрому $T_{iz}^H=2,7$, які мінімізують критерій (3)

$$I^H = \frac{1}{T_{mod}} \int_0^{T_{mod}} e^2(t^H) dt^H, \quad (3)$$

де $e(t^H)$ – змінна помилки САР, $T_{mod}=20\tau_o^H$ - час моделювання. В експерименті на вхід ОР подавалося координатне збурення $f_k(t^H=0) = 0 \rightarrow 10$.

Для переналаштування коефіцієнта передачі регулятора $k_r(t)$ САР обрана залежність, яка пройшла перевірку багаторічною практикою:

$$k_o(t) \cdot k_r(t) = \frac{\alpha T_o}{\tau_o} = A^z, \quad (4)$$

де α , A^z - константи, які визначають ступінь згасання (коливальність) перехідного процесу.

Досліджені межі стійкості базової САР і її частотні властивості по каналах координатних збурень « $f_k(t)$ - $y(t)$ » і шумів « $f_n(t)$ - $y(t)$ ».

В експериментах на САРС по каналу « f_k - y » впливали координатні збурення $f_k(t) = m_{f_k} + \tilde{f}_k(t)$:

$$m_{f_k} = 1, \quad S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega / 0,25)^4), \quad (5)$$

$$m_{f_k} = 1, \quad S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega / 0,5)^4), \quad (6)$$

$$m_{f_k} = 1, \quad S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega / 0,75)^4), \quad (7)$$

де m_{f_k} – постійна складова $f_k(t)$, $S_{\tilde{f}_k}(\omega)$ – спектральна щільність випадкової складової $\tilde{f}_k(t)$. Вона формувалася із псевдобілого шуму за допомогою формуючого фільтра $W^{f_k}(s) = \omega_{f_k}^2 / (s^2 + \sqrt{2} \cdot \omega_{f_k} s + \omega_{f_k}^2)$, де ω_{f_k} - частота його зрізу. Моделі (5), (6) відповідають гіпотезі про низькочастотний характер координатних збурень $f_k(t)$ відносно амплітудо-частотної характеристики (АЧХ) САР, яка характеризує область частот власного руху системи, а модель (7) спеціально обрана з порушенням цієї гіпотези.

Шуми $f_n(t)$ формувалися із сигналу псевдобілого шуму за допомогою

смугового фільтра (8)

$$W^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L^n s + \omega_L^{n2}} \cdot \frac{\omega_H^{n2}}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H^n s + \omega_H^{n2}}, \quad (8)$$

де $\omega_L^n = 4 \text{ рад} / \text{с}$, $\omega_H^n = 6 \text{ рад} / \text{с}$ - його частоти зрізу, що задовольняють гіпотезі про високочастотний характер $f_n(t)$ у порівнянні з АЧХ базової САР.

Для дослідження ефективності САРС використані моделі параметричних збурень:

$$f_p(t) = k_o(t) = 1 + s_l \cdot t, \quad s_l = 0,002 \text{ або } s_l = -0,002, \quad (9)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = 4 + 3 \sin(0,005t), \quad (10)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1 + 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) \geq 0 \\ 1 + 0,55 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 1500 \text{ с} \\ 0, & t < 1500 \text{ с} \end{cases}. \quad (12)$$

Точність самоналагодження у сталому режимі функціонування САРС оцінювалася за показником

$$I_3 = \frac{1}{T_{\text{mod}} - t_1} \int_{t_1}^{T_{\text{mod}}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt, \quad (13)$$

де $t_1 = 50 \text{ с}$, $T_{\text{mod}} = 5000 \text{ с}$ визначали часові межі експериментів.

Теоретичні передумови ідентифікації в замкнутому контурі САР змінного коефіцієнта передачі ОР за рахунок виділення складової власного руху із загального руху регульованої змінної розглядаються в роботі на прикладі САРС по патенту UA 36671 (див. рис.1). При цьому передбачається, що контур самоналагодження розімкнутий і для придушення шумів використовуються смугові фільтри.

З рівнянь руху САРС, представлених у частотній області, визначаються дисперсії $D_{\tilde{y}_a}$, $D_{\tilde{y}_{ma}}$ змінних на виходах смугових фільтрів:

$$D_{\tilde{y}_a} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[|W^o(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 \cdot S_u(\omega) + |W^o(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 S_{fk}(\omega) + |W^{bf}(j\omega)|^2 S_{fn}(\omega) \right] d\omega, \quad (14)$$

$$D_{\tilde{y}_{ma}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W^m(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 S_u(\omega) d\omega. \quad (15)$$

де: $S_u(\omega)$, $S_{fk}(\omega)$, $S_{fn}(\omega)$ - спектральні щільності керуючого впливу $u(t)$, координатного збурення $f_k(t)$, шуму $f_n(t)$; $W^o(j\omega) = k_o W^{oi}(j\omega)$, $W^m(j\omega) = k_m W^{mi}(j\omega)$ - передатні функції ОР і його моделі, яка налаштовується, у частотній області; $W^{bf}(j\omega)$ - передатна функція смугових фільтрів у частотній області.

Коефіцієнти передачі k_o , k_m не залежать від частоти ω . Якщо за рахунок фільтрації вдається в основному придушити наслідки впливу на регульовану змінну $y(t)$ зовнішніх збурень $f_k(t)$ і $f_n(t)$, зробити їхніми незначущими, тоді в

(14) складові $|W^o(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 S_{fk}(\omega) \rightarrow 0$, $|W^{bf}(j\omega)|^2 S_{fn}(\omega) \rightarrow 0$. Отже, вирази (14), (15) приймуть вид:

$$D_{\tilde{y}_a} \approx k_o^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W^{oi}(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 \cdot S_u(\omega) d\omega, \quad (16)$$

$$D_{\tilde{y}_{ma}} = k_m^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W^{mi}(j\omega)|^2 \cdot |W^{bf}(j\omega)|^2 \cdot S_u(\omega) d\omega. \quad (17)$$

З (16), (17) випливає, що якщо модель досить точно описує динаміку реального об'єкта, тобто $W^{oi}(j\omega) \approx W^{mi}(j\omega)$, то при приблизній рівності дисперсій на виходах фільтрів $D_{\tilde{y}_a}(t) \approx D_{\tilde{y}_{ma}}(t)$ коефіцієнти передачі ОР і його моделі також будуть приблизно рівні $k_o^2 \approx k_m^2$.

Відповідно до прийнятої гіпотези про квазістаціонарність параметрів ОР на інтервалі T_{ks} , зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ відбуваються відносно повільно. Це робить необхідним і дає можливість обчислювати оцінки дисперсій (16), (17) на ковзному інтервалі часу $t_{oc} \leq T_{ks}$. У реальному часі такі оцінки одержують, наприклад, шляхом експоненційно зваженого усереднення випадкових процесів, у цьому випадку $\tilde{y}_a^2(t)$ і $\tilde{y}_{ma}^2(t)$, «пропускаючи» їх через динамічну ланку з передатною функцією $W^{eo}(s) = \frac{1}{0,5t_{oc}s+1} = \frac{1}{T_{oe}s+1}$:

$$\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc}) = \frac{1}{T_{oe}s+1} \cdot \tilde{y}_a^2(t), \quad \hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, t_{oc}) = \frac{1}{T_{oe}s+1} \cdot \tilde{y}_{ma}^2(t). \quad (18)$$

Важливо відзначити, що різниця оцінок $e_1(t, t_{oc}) = \hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc}) - \hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, t_{oc})$, так як і різниця дисперсій $D_{\tilde{y}_a} - D_{\tilde{y}_{ma}}$, пропорційна різниці $k_o^2 - k_m^2$. Зміни оцінки дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc})$ свідчать про початок змін коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР.

З викладеного випливає, що точність самоналагодження в САРС буде залежати від якості роботи фільтрів, їх здатності розділити вимушений і власний рух САР. Об'єктивним показником якості в цьому випадку є оцінка коефіцієнта кореляції, по якій визначається ступінь близькості змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ на виходах фільтрів:

$$\hat{r}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}} = \frac{\hat{R}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}}(\tau_k = 0)}{\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a} \cdot \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}} = \frac{\frac{1}{T_{mod} - t_1} \int_{t_1}^{T_{mod}} \tilde{y}_a(t) \cdot \tilde{y}_{ma}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T_{mod} - t_1} \int_{t_1}^{T_{mod}} \tilde{y}_a^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T_{mod} - t_1} \int_{t_1}^{T_{mod}} \tilde{y}_{ma}^2(t) dt}}, \quad (19)$$

де $\hat{R}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}}(\tau_k = 0)$ - оцінка кореляційного моменту при нульовому зрушенні між процесами; $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}$ - оцінки середньоквадратичних відхилень (СКВ) змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$.

У ході комп'ютерних експериментів порівнювалася ефективність фільтрації змінних $y(t)$, $y_m(t)$ лінійними смуговими фільтрами Баттерворта:

$$W_1^{bf}(s) = \frac{s}{s + \omega_L} \cdot \frac{1}{s + \omega_H}; \quad (20)$$

$$W_2^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H s + \omega_H^2}; \quad (21)$$

$$W_3^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,848 \cdot \omega_L \cdot s + \omega_L^2} \cdot \frac{s^2}{s^2 + 0,765 \cdot \omega_L \cdot s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,848 \cdot \omega_H \cdot s + \omega_H^2} \cdot \frac{\omega_L^2}{s^2 + 0,765 \cdot \omega_H \cdot s + \omega_H^2} \quad (22)$$

де $\omega_L=0,5$ рад/с, $\omega_H=3$ рад/с – частоти зрізів фільтрів у низькочастотній і високочастотній області, що охоплюють частотну область власного руху базової САР. Варіювався також час запізнення τ_m моделі ОР, аналогічної (1), що імітувало неточне знання параметрів об'єкта.

Результати комп'ютерних експериментів свідчать, що чим вище порядок фільтра по похідній високочастотної складової, тим ефективніше відфільтровуються наслідки впливу на змінні $y(t)$, $y_m(t)$ низькочастотних координатних збурень $f_k(t)$. Використання смугових фільтрів Баттерворта другого порядку (21) являє собою компроміс між ефективністю фільтрації і складністю програмної реалізації.

Дослідження функціонування САРС по патенту на корисну модель UA 36671 виявило фактори, які обумовлюють причини низької точності і нестійкості її контуру самоналагодження. Реалізовано кілька напрямків удосконалення САРС (див. рис. 2).

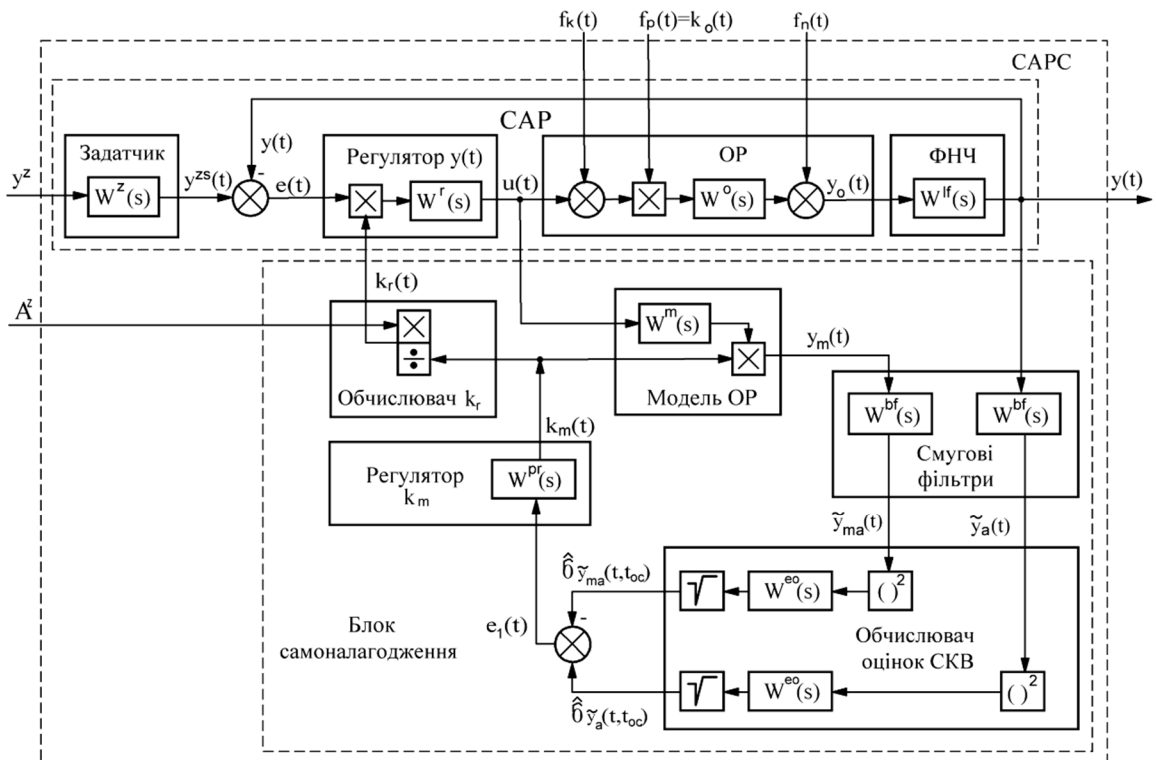


Рис. 2 Структурна схема базової САРС

Завдяки змінам структури моделі ОР зменшена інерційність контуру самоналагодження. У якості помилки регулювання даного контуру обрана різниця оцінок СКВ фільтрованих змінних, а не дисперсій, що дозволило його лінеаризувати. Також запропоновано модель ОР не включати за схемою

упереджувача Сміта, оскільки це приводить до зниження власного руху САР і погіршує умови самоналагодження.

Математична модель САРС, яка відповідає її структурній схемі, представлена двома взаємозалежними системами диференціальних і алгебраїчних рівнянь: (23) для САР і (24) для блоку самоналагодження.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} y_o(t) = W^o(s) \cdot (u(t) + f_k(t)) \cdot k_o(t) + f_n(t) \\ y(t) = W^{lf}(s) \cdot y_o(t), \quad y(t=0) \\ u(t) = W^r(s) \cdot e(t) \cdot k_r(t) = W^r(s) \cdot (y^{zs}(t) - y(t)) \cdot k_r(t), \quad u(t=0) \\ y^{zs}(t) = W^z(s) \cdot y^z, \quad y^{zs}(t=0) = y(t=0) \end{array} \right. \quad (23) \\ \left\{ \begin{array}{l} y_m(t) = (W^m(s) \cdot u(t)) \cdot k_m(t) \\ \tilde{y}_a(t) = W^{bf}(s) \cdot y(t) \\ \tilde{y}_{ma}(t) = W^{bf}(s) \cdot y_m(t) \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_a^2(t)} \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{ma}^2(t)} \\ k_m(t) = W^{pr}(s) \cdot e_1(t) = W^{pr}(s) \cdot (\sigma_{\tilde{y}_k}(t, \tau_{oc}) - \sigma_{\tilde{y}_{mk}}(t, \tau_{oc})), \quad k_m(t=0) \\ k_r(t) = A^z / k_m(t). \end{array} \right. \quad (24) \end{array} \right.$$

За результатами оптимального параметричного синтезу базової САРС, проведеного за допомогою програми Design Optimization пакета Matlab, отримані оптимальні значення параметрів передатних функцій блоку самоналагодження (24). У якості початкових значень частот зрізу смугового фільтра (21) рекомендується вибирати: у низькочастотній області $\omega_L \approx \pi/4\tau_o$ рад/с і у високочастотній області $\omega_H \approx \pi/2\tau_o$ рад/с, де τ_o – час запізнення ОР (1).

Результати комп'ютерних експериментів показують, що в цілому базова САРС при ідеалізованих умовах функціонування – при збігу параметрів $\tau_o = \tau_m$, $T_o = T_m$ ОР (1) і його моделі, забезпечує прийнятну для рішення практичних задач точність самоналагодження коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР. Однак в умовах, наближених до реальної експлуатації, тобто при зміні $k_o(t)$ у широкому діапазоні по моделі (11) і при $\tau_m = 1,5\tau_o$, базова САРС виявилася непрацездатною. Т.ч., для ефективного використання САРС в умовах промислової експлуатації необхідно подальше вдосконалення принципів побудови її структури і алгоритмів функціонування.

У **третьому розділі** розглядаються варіанти вдосконалення структури і алгоритмів САРС для підвищення її ефективності. Експериментально встановлено, що при зміні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР у контурі регулювання САРС із астатизмом першого порядку виникають додаткові помилки, які по зовнішніх ознаках нагадують швидкісні помилки в САР зі стаціонарними параметрами. Збільшення порядку астатизму контуру регулювання усуває сталі складові помилок регулювання, які пропорційні швидкості зміни коефіцієнта передачі ОР. Оскільки застосування регуляторів з інтеграторами високих

порядків знижує зону стійкості контуру регулювання САРС, то доцільним компромісом буде застосування регулятора з інтеграторами не вище другого порядку, тобто ПІІ²-регулятора.

Для підвищення ефективності контуру самоналагодження САРС у роботі аналізуються причини, які впливають на його точність і стійкість, а також пропонуються шляхи вдосконалення структури і алгоритмів цього контуру.

У контурі самоналагодження базової САРС (див. рис. 2) послідовно включені інерційні ланки смугового $W^{bf}(s)$ і усереднюючого $W^{eo}(s)$ фільтрів обмежують область його стійкості і, отже, коефіцієнт передачі його регулятора, що негативно впливає на динамічну точність самоналагодження до змінного коефіцієнта передачі ОР. Удосконалення структури даного контуру за рахунок виключення з нього перерахованих інерційних ланок дозволяє підвищити його швидкодію, збільшити коефіцієнт передачі регулятора контуру, що в підсумку підвищує динамічну точність самоналагодження.

У контурі самоналагодження базової САРС при обчисленні оцінок СКВ складових власного руху регульованої змінної ОР $\tilde{y}_a(t)$ і його моделі $\tilde{y}_{ma}(t)$ виникають помилки, обумовлені розбіжністю динамічних властивостей об'єкта і його моделі, які приводять до фазових зрушень між цими змінними. Аналогічні зрушення породжуються, якщо координатні збурення викликають появу в регульованій змінній складових широкого спектрального складу, з яких середньочастотні складові не можуть бути відфільтровані смуговими фільтрами. Джерела фазових зрушень можна розглядати, як шуми, що діють на контур самоналагодження САРС, які неможливо відфільтрувати через збіг їх спектрів. Розроблений алгоритм формування оцінки СКВ дозволяє зменшити вплив цих шумів, підвищити точність самоналагодження і робастність контуру до факторів, які породжують фазові зрушення.

У контурі самоналагодження базової САРС значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР впливає на коефіцієнт передачі контуру. Це звужує область стійкості контуру і його точність. Запропонований додатковий контур регулювання стабілізує на заданому рівні σ^z оцінку $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc})$ змінної об'єкта із пропорційним масштабуванням оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t, t_{oc})$ його моделі. Це дозволяє підвищити точність і забезпечити стійкість контуру самоналагодження у всьому діапазоні змін коефіцієнта передачі ОР.

У базовій САРС при керуванні процесом переходу ОР з холостого ходу на робоче навантаження апріорна невизначеність коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта може стати причиною нестійкості системи і збільшує ризики виникнення аварійних ситуацій. Запропоновані алгоритми для пускових режимів прискорюють процес виходу регульованої змінної на задане значення, завершують процедуру самоналагодження протягом періоду пуску, мінімізують згадані ризики та забезпечують безударний перехід контурів регулювання і самоналагодження від пускового до сталого режиму функціонування.

Запропоновані напрямки вдосконалення САРС змінили її структурну схему (див. рис. 3).

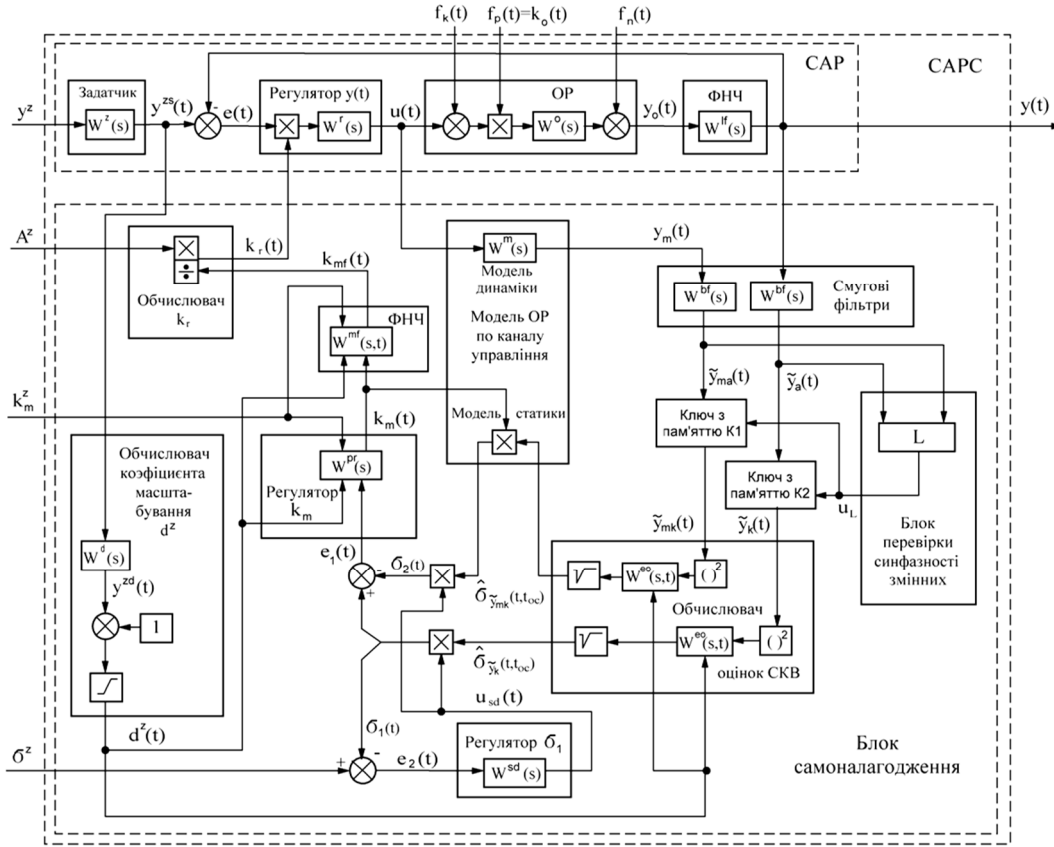


Рис. 3 Структурна схема всережимної робастної САРС, яка реалізує концепцію пасивної ідентифікації ОР з виділенням її власного руху

Поява нових елементів також спричинила доповнення в математичній моделі (24) блоку самоналагодження САРС:

$$\left. \begin{aligned}
 u_L(t) = L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)) &= \begin{cases} 1, & \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = 1 \\ 0, & \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = -1 \end{cases}, \\
 \tilde{y}_k(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_a(t), & u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_a(t = t_k), & u_L(t) = 0 \end{cases}, \\
 \tilde{y}_{mk}(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_{ma}(t), & u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_{ma}(t = t_k), & u_L(t) = 0 \end{cases}, \\
 \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) &= \sqrt{W^{eo}(s, t) \cdot \tilde{y}_k^2(t)} = \sqrt{(1/(T_{oe}/d^z \cdot s + 1)) \cdot \tilde{y}_k^2(t)}, \\
 \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) &= \sqrt{W^{eo}(s, t) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)} = \sqrt{(1/(T_{oe}/d^z \cdot s + 1)) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)}, \\
 \sigma_1(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t), \\
 \sigma_2(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t) \cdot k_m(t), \\
 y^{zd}(t) &= W^d(s) \cdot y^{zs}(t) = (T_d s / (0.2 \cdot T_d s + 1)) \cdot y^{zs}(t), \\
 d^z(t) &= \begin{cases} 1 + y^{zd}(t), & 1 + y^{zd}(t) < d^{z \max} \\ d^{z \max}, & 1 + y^{zd}(t) \geq d^{z \max} \end{cases}, \\
 k_m(t) &= W^{pr}(s, t) \cdot e_1(t) = k_{pr}^c \cdot W_{in}^{pr}(s) \cdot e_1(t) = k_{pr} \cdot d^z \cdot W_{in}^{pr}(s) \cdot e_1(t), \quad k_m(t=0) = k_m^z, \\
 k_{mf}(t) &= W^{mf}(s, t) \cdot k_m(t) = (1/(T_{mf}/d^z \cdot s + 1)) \cdot k_m(t), \quad k_{mf}(t=0) = k_m^z, \\
 u_{sd}(t) &= W^{sd}(s) \cdot e_2(t) = W^{sd}(s) \cdot (\sigma^z - \sigma_1(t)), \quad u_{sd}(t=0) = 1, \\
 k_r(t) &= A^z / k_{mf}(t),
 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

де L – логічна функція перемикавання; σ^z – задане значення змінної σ_I ; k_m^z – задане початкове значення $k_m(t=0)$.

Для перевірки ефективності запропонованих напрямків удосконалення системи проведений багатофакторний комп'ютерний експеримент. При дослідженні всережимної робастної САРС додатково використані наступні моделі:

- модель (передатна функція) інерційної частини регулятора $y(t)$:

$$W^r(s) = 1 + 1/T_{iz}s + 1/T_{iz}T_{iz1}s^2 \quad (26)$$

де T_{iz} , T_{iz1} – постійні часу;

- передатна функція регулятора k_m :

$$W^{pr}(s) = k_{pr}(1 + 1/T_{izp}s + 1/T_{izp}T_{izp1}s^2), \quad (27)$$

де k_{pr} ; T_{izp} , T_{izp1} – коефіцієнт передачі і постійні часу;

- передатна функція регулятора σ_1 :

$$W^{sd}(s) = k_{sd}(1 + 1/T_{isd}s), \quad (28)$$

де k_{sd} ; T_{isd} – коефіцієнт передачі і постійна часу.

Параметри регуляторів і фільтрів блоку самоналагодження визначалися в результаті процедури оптимального параметричного синтезу за критерієм (3) для кожного варіанта САРС.

Модель координатних збурень $f_k(t) = m_{f_k} + \tilde{f}_k(t)$ (6) доповнена східчастою складовою:

$$m_{f_k} = -5 + \begin{cases} 1, & t < 300 + 300 \cdot n \\ -1, & t \geq 300 + 300 \cdot n \end{cases}, \quad (29)$$

де n – ціла частина від $T_{mod} / 50$, T_{mod} - час моделювання.

Усього в ході експериментів проведений аналіз семи структур САРС для ідеалізованих умов роботи і для умов, близьких до промислової експлуатації. По черзі моделювалися: базова САРС із використанням регуляторів (26), (27) (код А1); САРС зі зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження (код А2); САРС зі стабілізацією нормованої помилки контуру самоналагодження (код А3); САРС із малоінерційним контуром самоналагодження (код В1); САРС із малоінерційним контуром самоналагодження і зменшення впливу фазових зрушень (код В2); САРС із малоінерційним контуром самоналагодження та зі стабілізацією його нормованої помилки (код В3); САРС із малоінерційним контуром самоналагодження і зменшення впливу фазових зрушень, а також зі стабілізацією його нормованої помилки (код В4).

По кожному з варіантів спочатку для ідеалізованих умов, тобто при впливі координатних збурень без східчастих складових (6) і за умови повного збігу параметрів моделі ОР з динамічними характеристиками ОР (1), проведені випробування тестовими змінами $k_o(t)$ по моделях (9), (10) або (12). Експерименти проводилися з оптимальними для кожного варіанта параметрами фільтрів (18), (21) і регуляторів (26-28).

Для моделюванні умов, близьких до умов промислової експлуатації,

використовувалася модель координатних збурень $f_k(t)$ (11), і запізнення в моделі τ_m спеціально була встановлено з перевищенням запізнення ОР $\tau_m = 1,5 \cdot \tau_o$. Приклади змін змінних САРС показані на рис. 4, а частина підсумкових результатів експериментів зведена в таблицю 1.

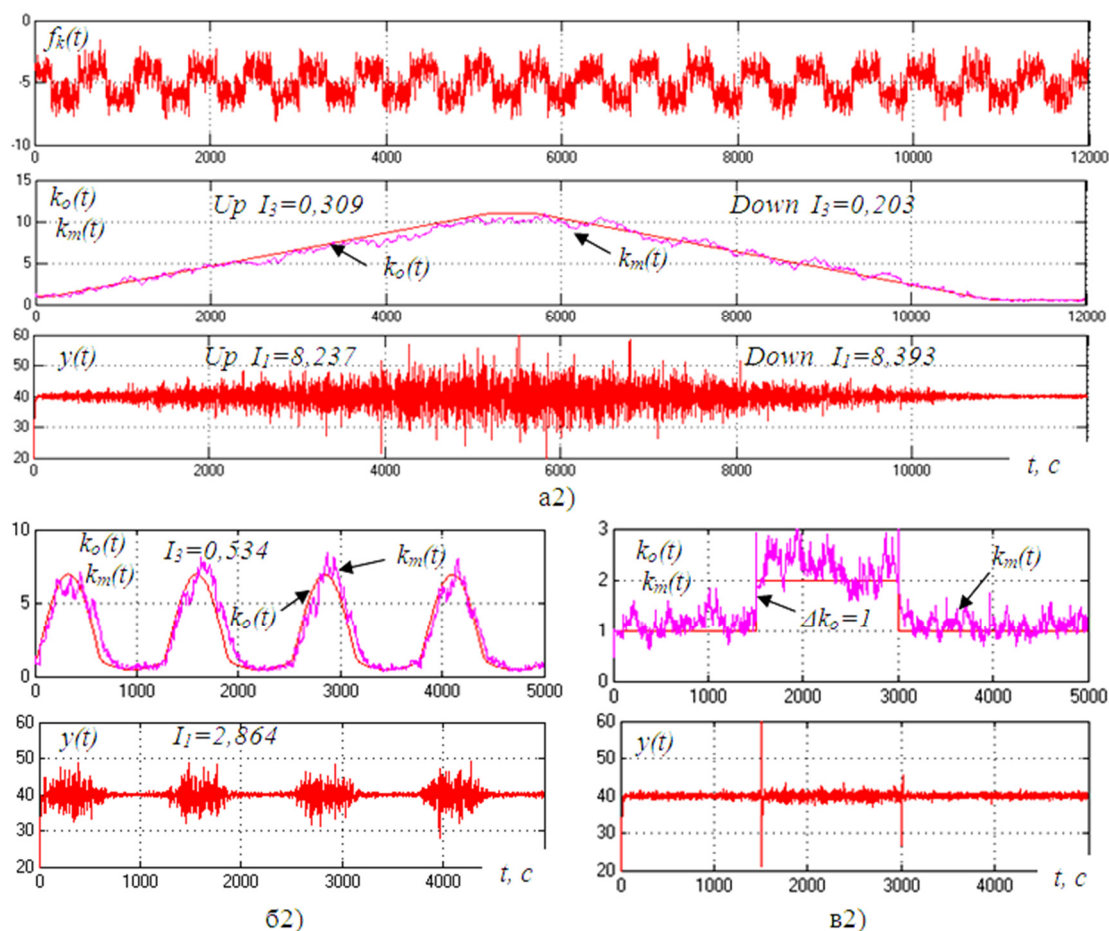


Рис. 4. – Зміни змінних САРС із кодом В4 в умовах координатних збурень $f_k(t)$ (29) на тестові зміни $k_o(t)$: а2 – по моделі (9), б2 – по моделі (11), в2 – по моделі (12)

Табл. 1 – Порівняльні результати роботи різних варіантів САРС для умов промислової експлуатації

Код САРС	Моделі $k_o(t)$						Грубість до стрибків $k_o(t)$
	(11)		(9), $sl = 0,002$		(9), $sl = -0,002$		
	Значення критеріїв						
	I_1	I_3	I_1	I_3	I_1	I_3	
A1	5,247	4,812	8,314	0,176	8,623	0,543	+
A2	3,842	5,091	8,248	0,210	8,439	0,307	+
A3	4,194	4,426	8,226	0,162	8,493	0,284	+
B1	2,806	0,628	8,382	0,692	8,566	0,843	+
B2	2,857	0,785	8,562	1,218	8,697	1,370	+
B3	2,845	0,641	8,231	0,195	8,473	0,263	+
B4	2,864	0,534	8,237	0,309	8,393	0,203	+

Аналізуючи результати експериментів, можна дійти висновку, що об'єднання розглянутих напрямків удосконалення структури САРС підвищує

точність її самоналагодження. Особливо слід виділити здатність систем з малоінерційним контуром самоналагодження (коди В1-В4) до роботи в умовах змін коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР у широкому діапазоні (модель параметричних збурень (11)).

Серія комп'ютерних експериментів присвячена перевірці робастності САРС до варіацій параметрів ОР і його моделі. Аналіз результатів експериментів показав, що САРС із малоінерційним контуром самоналагодження і зменшенням впливу фазових зрушень, а також зі стабілізацією його нормованої помилки (код В4) більш робастна до зростання запізнення τ_o в ОР, а також до неточного визначення запізнення τ_m моделі ОР у порівнянні із САРС базової структури (код А1).

Результати досліджень САРС у режимі пуску ОР показали, що система з масштабуванням параметрів регулятора і фільтрів контуру самоналагодження на період пуску з встановленим початковим значенням коефіцієнта передачі $k_m(t=0)=k_o^{max}$ забезпечує аперіодичний характер перехідних процесів $y(t)$, $k_m(t)$ без порушень регламентних значень. Самоналагодження коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ до поточного значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОР відбувається за час пускового режиму.

Запропонована методика визначення параметрів контуру самоналагодження САРС дає можливість провести розрахунок по тим же вихідним даним, які традиційно використовуються для розрахунків параметрів налаштування регуляторів звичайної САР. Це максимально спрощує процес впровадження системи.

У **четвертому розділі** розглядається реалізація блоку самоналагодження САРС у вигляді програмного модуля для промислових контролерів SIMATIC. Для створення програм, які реалізують динамічні ланки контуру регулювання і контуру самоналагодження САРС, здійснений перехід від їх диференціальних рівнянь до різницевих і отримані рекурентні вирази, які зв'язують змінну виходу ланки зі змінної входу. Створений програмний модуль написаний у середовищі Step 7 (SIMATIC S7, STEP 7 V5.4 SP2, Order No./ Bestell-Nr.: 1P 6ES7810-4CC08-0YA5, License-No./Lezenz-Nr.: S 00401000072060713837) у вигляді одного функціонального блоку, невимогливий до ресурсів - займає 2 Кбайт робочої пам'яті, час його виконання менш 10 мс. Напівнатурне моделювання САРС на створеному стенді показало, що програмна реалізація розроблених алгоритмів самоналагодження проведена коректно, тому що результати верифікації системи при напівнатурному моделюванні практично збігаються з результатами її імітаційного моделювання.

На етапі теоретичних досліджень у складі САРС використовувалися ідеалізовані моделі ОР, які не відбивають особливостей реальних об'єктів. Стосовно таких ОР алгоритми самоналагодження можуть виявитися неробастними. Для перевірки ефективності розроблених алгоритмів в якості тестового об'єкта обрана молоткова дробарка для подрібнювання компонентів комбікормів. Властивості дробарки як об'єкта керування, по-перше, адекватні поставленій задачі, тому що її коефіцієнт передачі по каналу керування змінюється в 10 і більш раз, по-друге, вона має суттєво нелінійну статичну

характеристику, відрізняється невизначеністю параметрів моделей динаміки. Перераховані особливості добре відбивають властивості не тільки дробарки, але й багатьох інших реальних об'єктів.

Результати імітаційного моделювання САР з постійними налаштуваннями регулятора струму навантаження $I(t)$ електропривода дробарки показали, що в процесі функціонування система не забезпечує достатню точність стабілізації або стає нестійкою.

В аналогічних умовах САРС молоткової дробарки стійка у всьому робочому діапазоні змін $F(t)=35\dots55$ А. При імітації пошукових рухів системи оптимізації розроблена САРС забезпечує спостереження за змінним заданим значенням $F(t)$ з достатньою для практичних застосувань точністю. Напівнатурне моделювання САРС на створеному стенді підтвердило ефективність розроблених алгоритмів самоналагодження і коректність їх програмної реалізації. Вона може бути використана в складі систем оптимізації як адаптивна система стабілізації.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлені обґрунтування і нове рішення науково-технічної задачі підвищення ефективності функціонування ОР технологічного типу зі змінними в широких діапазонах коефіцієнтами передачі за рахунок вдосконалення алгоритмів самоналагодження САР.

Основні результати і висновки по дисертації полягають у наступному.

1. Концепція самоналагодження регулятора в замкнутій САР, заснована на пасивній ідентифікації об'єкта регулювання з виділенням із загального руху регульованих змінних об'єкта і його моделі складових їхнього власного руху, перспективна для побудови САРС. Відома реалізація самоналагоджувальної системи за цією концепцією має ряд недоліків. Їхні причини: а) залежність коефіцієнта передачі контуру самоналагодження від коефіцієнта передачі ОР; б) невідповідність запізнення та інерційності моделі ОР динамічним властивостям об'єкта; в) значна інерційність контуру самоналагодження; г) його істотна нелінійність.

2. Виділення складових власного руху регульованих змінних ОР і його моделі можливо лінійними смуговими фільтрами Баттерворта. Доцільний порядок диференціального рівняння фільтра обґрунтований, в основному, як компроміс між результативністю фільтрації і складністю його програмної реалізації.

3. Істотне підвищення ефективності САРС досягається на основі розроблених нових структур і алгоритмів контуру самоналагодження, які: а) стабілізують його коефіцієнт передачі, що дозволяє забезпечити стійкість контуру у всьому діапазоні змін коефіцієнта передачі ОР; б) формують оцінки імовірнісних характеристик складових власного руху тільки за рахунок його синфазних ділянок, що дозволяє підвищити робастність контуру самоналагодження до змін запізнення та інерційності ОР; в) виводять із контуру інерційні складові моделі ОР, смугового та

усереднюючого фільтрів, що дозволяє підвищити його швидкодію і точність самоналагодження коефіцієнта передачі регулятора САР до змінного коефіцієнта передачі ОР; г) використовують у якості оцінок імовірнісних характеристик оцінки СКВ складових власного руху, що розширює область стійкості контуру самоналагодження.

4. Алгоритми самоналагодження САРС для пускових режимів ОР дозволяють завершити процедуру самоналагодження протягом періоду пуску, запобігти неприпустимим динамічним помилкам регулювання і забезпечити безударний перехід контурів регулювання і самоналагодження від пускового до сталого режиму функціонування.

5. Підвищення точності стабілізації регульованої змінної досягається за рахунок збільшення порядку астатизму контуру регулювання САРС, що усуває сталі складові помилок регулювання, які пропорційні швидкості зміни коефіцієнта передачі ОР.

6. Спільне застосування розроблених напрямків вдосконалення САРС має синергетичний ефект. Система зберігає стійкість в умовах зміни нормованого коефіцієнта передачі ОР у діапазоні 0,5...10 (тобто в 20 раз) у порівнянні з первісним одиничним значенням при високій динамічній точності стабілізації регульованої змінної.

7. Область застосування розроблених алгоритмів ширша, ніж для лінійних ОР, які входили до складу САРС на етапі теоретичних досліджень. Вони зберігають свою високу ефективність для об'єктів з різними видами нелінійностей, зокрема, досить несприятливих, коли коефіцієнт передачі зростає з наближенням до оптимальних режимів, при яких різко зростає ймовірність виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з виходом регульованої змінної за регламентні допуски.

8. Запропонована методика визначення параметрів контуру самоналагодження САРС дає можливість провести розрахунок по тим же вихідним даним, які традиційно використовуються для розрахунків параметрів налаштування регуляторів звичайної САР. Це максимально спрощує процес впровадження системи.

9. Розроблений програмний модуль для промислових контролерів SIMATIC реалізує алгоритми контуру самоналагодження САРС і легко інтегрується з функціональними блоками регулювання, які входять до складу стандартних бібліотек середовища програмування Step 7. Модуль прийнятий до використання в розробках ТОВ «С-Інжиніринг». Алгоритмічне та програмне забезпечення САРС використовується в навчальному процесі на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Levinskyi M., Stepanov M. Workbench for control systems trials based on VIPA 300 controller and Advantech input/output card. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. №6(4). С.102-105.

2. Левинский М.В. Тестовые САР для исследования алгоритмов их самонастройки. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015. №48. С.142-146.

3. Khobin V., Levinskyi M. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2016. №8(2). С.31-38.

4. Khobin V., Levinskyi M. Filters research for free motion extraction in self-tuning automatic control systems. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2016. №8(3). С.24-35.

5. Хобин В.А., Левинский М.В. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2016. №4. С.120-129.

6. Хобін В.А., Левінський М.В. Принципи, алгоритми і результати підвищення ефективності самоналагоджувальної системи керування об'єктом технологічного типу. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. №2. С.172-181.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Левинский М.В. Совершенствование алгоритмов адаптивного управления объектами технологического типа . *Автоматика – 2015*: Матеріали ХХІІ міжнародної конференції з автоматичного управління, 10 – 11 вересня 2015р. Одеса: Одес. нац. політехн. університет, 2015. С. 115-116.

8. Левинский М.В. Разработка и исследование первоначальной структуры САР с самонастройкой коэффициента передачи. *Інформаційні технології та автоматизація – 2015*: Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції, 15-16 жовтня 2015 р. Одеса: Одес. нац. акад. харч. технологій., 2015. С. 36-37.

9. Khobin V., Levinskyi M. Research of self-tuning ACS with varying transition coefficient control object of technological type . *Information technology and automation – 2016*. Conference proceedings of IX annual scientific conference 11-14 october, 2016. Odessa: Odessa national academy of food technologies., 2016. P. 27-28.

10. Хобін В.А., Левінський М.В. Автоматична самоналагоджувальна система керування об'єктом технологічного типу. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології-2017*: Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 19-20 квітня, 2017. Київ: Київський політехн. універ., 2017. С. 17-18.

11. Хобін В.А., Левінський М.В. Самоналагоджувальна система керування об'єктом технологічного типу. *Автоматика – 2017* : Матеріали ХХІV міжнародної конференції з автоматичного управління, 13-15 вересня 2017. Київ: Київськ. нац. універ. біорес. і природ. корист., 2017. С.127-128.

12. Khobin V., Levinskyi M. Application of hammer mill mathematical model for testing developed self-tuning algorithms . *Information technology and automation – 2017: Conference proceedings of X annual scientific conference, 2-6 october, 2017.* Odessa: Odessa national academy of food technologies, 2017. P. 48-49.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. Спосіб самоналагодження коефіцієнта передачі регулятора: пат. 113967 Україна: МПК G05B 13/02 (2006.01). № 201608214; заявл. 25.07.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4. 10 С.

Анотація

Левінський М.В. Адаптивне керування об'єктами технологічного типу: алгоритми пасивного самоналагодження коефіцієнта передачі регуляторів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за фахом 05.13.07 – Автоматизація процесів керування, Одеська національна академія харчових технологій, Національний університет харчових технологій, Київ, 2018.

У дисертації представлено нове рішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності функціонування ОР технологічного типу зі змінними в широких діапазонах коефіцієнтами передачі за рахунок удосконалення алгоритмів самоналагодження САР.

Одержала подальший розвиток відома концепція самоналагодження регулятора в замкнутій САР на основі пасивної ідентифікації об'єкта регулювання шляхом виділення із загального руху регульованих змінних об'єкта і його моделі складових їхнього власного руху, формування контуру самоналагодження, у якому задача ідентифікації коефіцієнта передачі об'єкта зводиться до задачі регулювання і забезпечується приблизна рівність оцінок імовірнісних характеристик регульованої змінної об'єкта і його моделі.

Обґрунтований вибір порядку диференціального рівняння смугових фільтрів Баттерворта для виділення складових власного руху регульованої змінної ОР і його моделі як компроміс між ефективністю фільтрації і складністю їх програмної реалізації.

Розроблені нові структури і алгоритми контуру самоналагодження, які компенсують недоліки відомої системи і підвищують точність, швидкодію, стійкість і робастність контуру самоналагодження САРС об'єктами технологічного типу зі змінними в широкому діапазоні коефіцієнтами передачі.

Розроблені алгоритми самоналагодження САРС для пускових режимів ОР, які дозволяють завершити процедуру самоналагодження протягом періоду пуску, запобігти неприпустимим динамічним помилкам регулювання і забезпечити безударний перехід контурів регулювання і самоналагодження від пускового до сталого режиму функціонування.

Удосконалені алгоритми контуру регулювання САРС, що ліквідують сталі складові помилок регулювання, які пропорційні швидкості зміни коефіцієнта передачі ОР.

Показано, що спільне застосування розроблених напрямків удосконалювання САРС має синергетичний ефект. Алгоритми самоналагодження зберігають свою високу ефективність для об'єктів з різними видами нелінійностей.

Розроблена методика визначення параметрів контуру самоналагодження САРС, яка дає можливість провести розрахунок по тим же вихідним даним, що і для регуляторів звичайної САР.

Розроблений програмний модуль для промислових контролерів SIMATIC, який реалізує алгоритми контуру самоналагодження САРС і легко інтегрується з функціональними блоками регулювання, які входять до складу стандартних бібліотек середовища програмування Step 7.

Ключові слова: самоналагодження САР, коефіцієнт передачі об'єкта, складова власного руху регульованої змінної.

Abstract

Levinskyi M.V. Adaptive control of technological type control objects: algorithms of controllers gain passive self-tuning. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for a degree of Ph.D. in technical science speciality 05.13.07 – Automation of control processes, Odessa national academy of food technologies, National university of food technologies, Kiev, 2018.

The new solution to the topical scientific-technical task of the technological type control object (CO) with varying in wide range gain operation effectiveness increase due to improvement of automatic control system (ACS) self-tuning algorithms was presented in the thesis.

Well-known concept of controller self-tuning in closed-loop ACS on the basis of CO passive identification has obtained further development by separating the components of own motion from CO and its model controlled variables total motion, implementing the self-tuning loop, in which the task of CO gain identification is limited to the task of control and the approximate equality of CO and its model controlled variables stochastic characteristics estimates is ensured.

The order selection of the Butterworth band pass filters differential equations for separating the CO and its model controlled variables own motion has been substantiated as a compromise between the filtering efficiency and the complexity of their software implementation.

New structures and algorithms of self-tuning loops were developed, which compensate shortcomings of known system and increase accuracy, speed, stability and robustness of self-tuning ACS (STACS) with technological type CO which has gain that vary in wide range. STACS self-tuning algorithms for CO startup modes, that allow to complete the self-tuning procedure during the startup period, to prevent unacceptable dynamic control errors and to ensure the unstressed transition of control

and self-tuning loops from initializing to steady mode of operation have been developed.

STACS control loop algorithms have been improved, which eliminates the steady-state components of control errors, that are proportional to the CO gain rate change.

It is shown that the joint application of the developed directions for the improvement of STACS has synergistic effect. Self-tuning algorithms retain their high efficiency for objects with different types of nonlinearities.

A technique for determining the parameters of the STACS self-tuning loop has been developed which makes it possible to do calculations using the same initial data as for controllers in the conventional ACS.

Software module for Simatic industrial controllers has been created. It implements the algorithms of STACS self-tuning loop and is easily integrated with the functional control units included in the standard libraries of the Step 7 programming environment.

Key words: self-tuning ACS, object gain, controlled variable own motion component.