

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

БУНКЕ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.181.1:681.5

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ
КОНТУРАМИ КОТЛОАГРЕГАТА ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ КОРЕКЦІЇ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ — 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти та науки України на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Ковриго Юрій Михайлович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Казак Василь Миколайович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту

кандидат технічних наук, доцент
Сідлецький Віктор Михайлович,
Національний університет харчових технологій,
доцент кафедри інтегрованих автоматизованих систем управління

Захист відбудеться 21 жовтня 2014р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 438.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 18 вересня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., професор



Л. С. Ямпольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з головних напрямків розвитку в «Енергетичній стратегії України на період до 2030 року» визначені теплові електростанції (ТЕС) як одне з основних джерел електроенергії. Саме вони відіграють надважливу роль у змінній частині графіку навантажень енергосистеми України, тому що атомні станції постійно працюють у базовому режимі, а гідроелектричні ресурси України у руслі Дніпра обмежені. Основним видом палива для українських ТЕС є вугілля - доля використання вугільного палива складає 82%. Його використання ускладнює процес керування, адже практично неможливо точно виміряти та регулювати витрату на пальниках, а якість і вологість вугілля може змінюватися в процесі роботи котлоагрегата, створюючи додаткові збурення в топочній камері.

Забезпечення точності та якості регулювання технологічних змінних енергоблоку необхідне для стабільності частоти електричного струму, економічного використання енергоресурсів, збільшення терміну міжремонтної експлуатації обладнання. ТЕС як об'єкти регулювання, у більшості випадків, змінюють свої параметри в залежності як від режимів роботи (при зміні навантаження, в маневрових режимах), так і часу експлуатації (утворення накипу, збільшення люфтів, зменшення товщини стінок труб і т.п.).

Досвід практичної експлуатації показує, що традиційні системи автоматичного регулювання (САР), побудовані на основі стандартних ПД-регуляторів, мають недоліки в умовах маневрених режимів роботи устаткування і наявності значних перехідних та транспортних запізнювань в системі. Використання диференційної компоненти ускладнено сильними завадами при вимірюванні параметрів, крім цього ПД-алгоритм більш чутливий до змін параметрів об'єкта ніж ПІ, тому часто в регуляторах застосовують саме пропорційно-інтегральний закон регулювання. ПІ-регулятори залишаються основними в контурах керування енергоблоку, що обумовлене як технічними причинами: задовільна якість регулювання в номінальних режимах, відносна простота налаштування та аналізу поведінки; так й організаційними: процедурі введення в експлуатацію радикально нових рішень заважають тривалий період дослідної експлуатації, необхідність додаткового навчання операторів, значна робота з нормативною та технічною документацією.

Тому розробка нових рішень в царині автоматизації, що забезпечують високу якість регулювання у маневрених режимах роботи енергоблоків та гарантують стійкість САР у всьому передбаченому діапазоні навантажень, але одночасно з цим побудовані на класичній теорії автоматичного керування й традиційних для теплоенергетики ПІ-законів регулювання, є актуальною науковою проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Зміст роботи, її основні задачі відповідають основним науково-технічним програмам, які сформульовані в Законі України «Про науку і науково-технічну діяльність».

Дисертаційні дослідження виконані в межах тематики науково-дослідної роботи, що проводилася на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів НТУУ «Київський політехнічний інститут» за держбюджетними темами: «Автоматичне керування теплоенергетичними об'єктами у змінних режимах роботи» (номер держреєстрації 0110U002291), «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (номер держреєстрації 0112U001751), у яких автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності та надійності роботи теплоенергетичного обладнання енергоблоку ТЕС, що працює у маневрених режимах, шляхом вдосконалення алгоритму регулювання інерційними контурами.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- дослідження статичних та динамічних властивостей ділянок пароводяного тракту котлоагрегата як об'єктів керування, ідентифікація та побудова математичних моделей;
- аналіз існуючих рішень щодо керування інерційними об'єктами у маневрених режимах роботи;
- розробка методу підвищення запасу стійкості систем регулювання, що базується на динамічній корекції частотних характеристик;
- розробка методик налаштування систем регулювання з динамічними коректорами;
- розробка всережимних систем автоматичного регулювання для інерційних контурів котлоагрегата;
- технічна реалізація САР на промислових засобах автоматизації.

Об'єкт дослідження — інерційні контури регулювання теплоенергетичних об'єктів.

Предмет дослідження — системи автоматичного регулювання інерційних ділянок пароводяного тракту прямоточного котлоагрегата ТЕС, що працює у маневрених режимах навантаження.

Методи дослідження. Дисертаційні задачі вирішувалися з використанням загальних методів теорії автоматичного керування, чисельних методів рішення диференціальних рівнянь, методів ідентифікації, оптимального параметричного синтезу, методів моделювання динамічних систем; для візуалізації результатів застосовувалися методи комп'ютерної графіки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- набули подальшого розвитку дослідження впливу транспортного запізнювання на якість роботи систем автоматичного регулювання, одержано діапазони граничних значень зміни транспортного запізнювання та коефіцієнту підсилення об'єкта управління в системах з ПІ-регулятором для типових теплоенергетичних об'єктів;
- вперше розроблено метод підвищення якості функціонування інерційних контурів регулювання теплоенергетичного обладнання, що працює в маневрених режимах, який відрізняється застосуванням додаткового каналу

динамічної корекції в структурі регулятора, що забезпечує підвищення запасу стійкості та показників якості систем автоматичного регулювання;

- вперше запропоновано аналітичну методику налаштування регулятора з паралельним динамічним коректором, що відрізняється корекцією відстані годографа АФЧХ розімкненої системи до критичної точки $(-1;j0)$ в частотній області та дозволяє синтезувати систему регулювання із заданим запасом стійкості;

- удосконалено експрес-методику налаштування регулятора шляхом розробки номограм та емпіричних залежностей параметрів каналу динамічної корекції від параметрів об'єкта керування, що дозволяє синтезувати систему регулювання, налаштовану на мінімум інтегрального абсолютного критерія якості перехідних процесів.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена система автоматичного регулювання температурного режиму пароводяного тракту, де застосування контуру динамічної корекції дозволило підвищити показники якості перехідних процесів та підвищити запас стійкості системи. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення впроваджене та експлуатується на Трипільській ТЕС, що підтверджено відповідними документами.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів.

Особистий внесок здобувача. Всі положення, що виносяться на захист, отримано автором особисто. В публікаціях у співавторстві особистий внесок здобувача полягає в наступному: розробка структури регулятора з динамічним коректором для схем врахування обмежень на керування [1, 3]; аналіз та вибір методів ідентифікації контурів керування [2]; алгоритмічне забезпечення комплексу ідентифікації [13, 16]; розробка методу підвищення ефективності регулювання інерційними контурами [4, 5, 6, 8, 9, 10, 17, 18, 19]; порівняння методів підвищення якості роботи САР, дослідження частотних та інтегральних показників якості функціонування систем [7, 11]; синтез САР температурного режиму пароводяного тракту, дослідження роботи системи при зміні навантаження енергоблока [12, 14, 15].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися на конференціях: VIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», м. Київ, 2010 р.; XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2011», м. Львів, 2011 р.; IX міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», м. Київ, 2011 р.; X міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», м. Київ, 2012 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино и приборостроении», м. Мінськ, 2012 р.; XIX міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2012», м. Київ, 2012 р.; XX міжнарод-

дна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2013», м. Миколаїв, 2013 р.; XI міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів, м. Київ, 2013 р.

Публікації. За результатами роботи опубліковано 19 наукових праць, 7 з яких у провідних фахових виданнях, у тому числі 3 статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, та 2 статті у виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus, 3 патенти на корисну модель та 9 публікацій у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел із 176 назв, загальних висновків та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 168 сторінок, з них основний зміст роботи викладено на 145 сторінках друкованого тексту. В тексті використано 77 рисунків та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність і сформульована основна ідея роботи, визначені наукова новизна і практична цінність роботи, наведені відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** роботи виконано аналіз проблем регулювання котлоагрегатами ТЕС. Показано, що цим об'єктам притаманні великі перехідні та транспортні запізнювання, як по каналам збурення, так і по керуючому впливу. Розглянуті сучасні підходи до керування інерційними об'єктами теплоенергетики. Задача регулювання ускладнюється існуючою на практиці невизначеністю параметрів самого об'єкта, постійною зміною навантаження протягом доби, і збурень, наприклад, за рахунок зміни якості та вологості вугільного палива. В той же час система має залишатися стійкою на всьому діапазоні зміни навантаження, забезпечувати допустимі відхилення параметра та час перехідного процесу, мінімальну коливальність. Розглянуто показники оцінки якості перехідних процесів та методи автоматизованого налаштування контурів регулювання з метою забезпечення виконання технологічних вимог до САР температурного режиму пароводяного тракту.

На практиці, для складних відповідальних об'єктів, використовується досить вузький спектр методів підвищення ефективності САР. Високу якість регулювання забезпечують системи, що використовують модель об'єкта у своїй структурі, зокрема регулятор Сміта та предиктивний пропорційно-інтегральний (ППІ) регулятор, також відомими є системи з адаптацією. Але суттєвою проблемою залишається зміна навантаження, так як більшість систем з внутрішньою моделлю не пристосовані до раптових змін параметрів об'єкта у широкому діапазоні значень, а системи з адаптацією потребують нанесення штучного збурення для проведення ідентифікації, що заборонене в умовах штатної експлуатації.

Для одночасного забезпечення необхідних динамічних показників якості регулювання та гарантованого запасу стійкості пропонується шукати нові структурні рішення для формування закону регулювання.

У кінці розділу наведено обґрунтування мети дисертаційної роботи і сформульовані основні задачі дослідження.

У другому розділі розроблені математичні моделі ділянок пароводяного тракту котлоагрегата потужністю 300 МВт Трипільської ТЕС, які описують поведінку об'єктів у всьому робочому діапазоні навантажень енергоблока.

Для параметричної ідентифікації моделі об'єкта керування було використано експериментальні дані, отримані при різних значеннях навантаження котлоагрегата: 300, 275 і 225 МВт. У якості вихідних змінних аналізувалися температури за нижньою радіаційною частиною (НРЧ), за верхньою радіаційною частиною (ВРЧ), та за поточним екраном (ПЕ) котлоагрегата енергоблоку №2. Параметри об'єкта керування отримано за експериментальними даними, див. рис. 1.

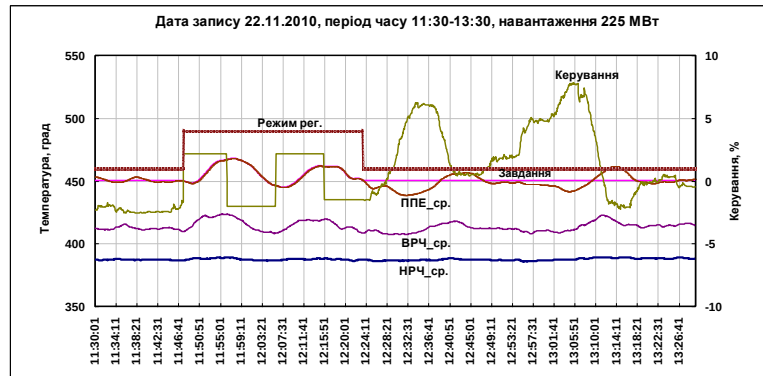


Рис. 1. Графіки переходних процесів по каналах НРЧ, ВРЧ і ПЕ при навантаженні 225 МВт

Для ідентифікації основних параметрів контурів регулювання теплового режиму застосовано метод додаткових членів. Значення параметрів ідентифікованої моделі об'єкта наведені у табл. 1.

Табл. 1. Параметри моделі при різних навантаженнях

N, МВт	K, °C/%BM	T1, с	T2, с	T3, с	tau, с
Канал НРЧ					
225	0,35	42	21	-	15
275	0,26	38	19	-	12
300	0,19	36	18	-	10
Канал ВРЧ					
225	3,1	90	45	-	25
275	1,9	84	42	-	20
300	1,6	80	40	-	17
Канал ПЕ					
225	4,6	110	55	27	120
275	3,1	106	53	26	107
300	2,5	102	51	25	100

Коефіцієнт передачі об'єкту може змінюватися у широких межах (від 80% до 150%) від середнього відповідно для навантажень 300 і 225 МВт, менш суттєвими є зміна транспортного запізнювання та сталих часу об'єкта.

Отримано передатні функції по трьом інформаційним каналам та проведена перевірка їх адекватності, відносна інтегральна похибка моделей не перевищує 3%. Структура моделей – передатні функції, що описуються набором послідовно сполучених аперіодичних ланок та транспортного запізнювання.

Передатна функція каналу НРЧ для навантаження 275 МВт має такий вигляд:

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0.26}{38 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{19 \cdot p + 1} \cdot e^{-12p} \quad (1)$$

Передатна функція каналу ВРЧ:

$$W_{ВРЧ}(p) = \frac{1.9}{84 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{42 \cdot p + 1} \cdot e^{-20p} \quad (2)$$

Передатна функція каналу ПЕ:

$$W_{ПЕ}(p) = \frac{3.1}{106 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{53 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{26 \cdot p + 1} \cdot e^{-107p} \quad (3)$$

Для інших навантажень структура передатних функцій залишається незмінною, варіюються лише коефіцієнти підсилення та сталі часу.

Для спрощення досліджень САР у частотній області була отримана математична модель еквівалентного об'єкта, що враховує канали з диференціаторами:

$$W_{ЕКВ}(p) = \frac{3.1}{140 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{70 \cdot p + 1} \cdot e^{-15p} \quad (4)$$

Отримані математичні моделі перевірені на адекватність, відносне інтегральне відхилення розгінних характеристик побудованих на основі моделей від усереднених розгінних характеристик, що ґрунтуються на експериментальних даних знаходиться у межах 2 – 3%, що є допустимим.

На основі порівняння розповсюджених інтегральних критеріїв якості перехідних процесів показано, що при оптимізації САР об'єктами зі змінними параметрами перевагу слід віддавати абсолютному інтегральному критерію з врахуванням часу (ITAE) (5).

$$ITAE = \int_0^T t^3 \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (5)$$

Даний критерій забезпечує більші запаси стійкості по підсиленню та фазі (див. рис. 2а) при задовільному динамічному відхиленні та мінімальній коливальності (рис. 2б).

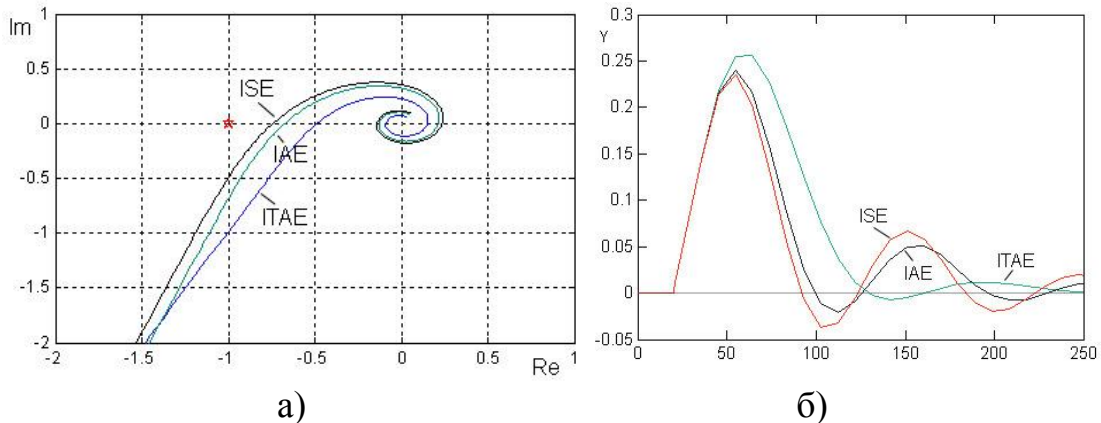


Рис. 2. Порівняння інтегральних критеріїв для оптимізації САР
а) в частотній області; б) в часовій області.

Виконано синтез штатної САР на базі ПІ-регулятора з параметрами, що забезпечують оптимальний ІТАЕ показник якості перехідних процесів. Визначені обмеження у частотній області стандартного ПІ-регулятора по стійкості і швидкодії. Показано, що штатний контур регулювання не здатний забезпечити якісні перехідні процеси при зміні навантаження.

Досліджено вплив зміни транспортного запізнювання на якість роботи САР, показані межі застосування ПІ-регуляторів для об'єктів зі змінними параметрами в залежності від відношення транспортного запізнювання до “ефективної” сталої часу $T + \tau$ (рис. 3).

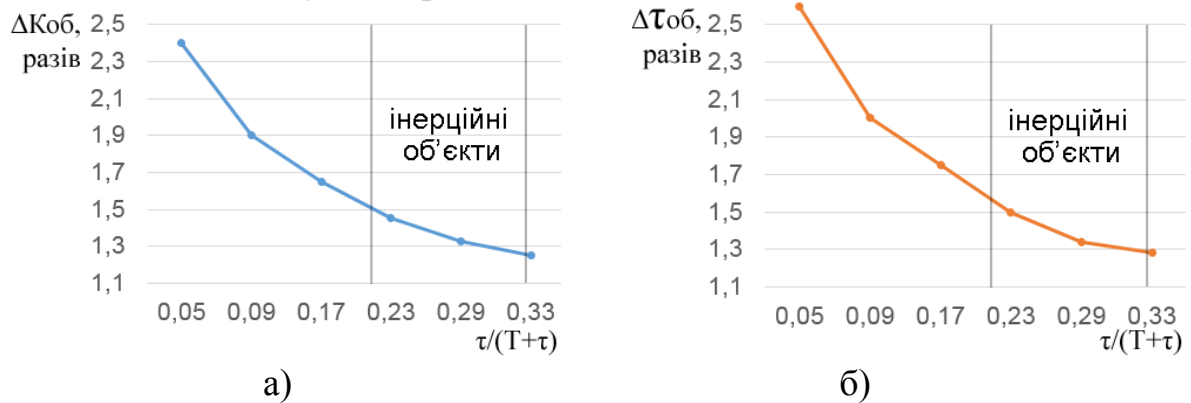


Рис. 3. Допустиме збільшення параметрів об'єкта для систем з ПІ-регуляторами
а) допустиме збільшення $K_{об}$; б) допустиме збільшення $\tau_{об}$

Показано, що при співвідношеннях $\tau/(T+\tau)$ від 0,2 до 0,3 та значних змінах $K_{об}$, характерних для теплоенергетичних об'єктів, стандартні ПІ алгоритми не забезпечують необхідні якість регулювання та запас стійкості. З цієї причини оператори технологічного процесу часто переводять САР в ручний режим, тому для зменшення впливу людського фактору є потреба в розробці та застосовувати нових рішень для керування нестационарними об'єктами.

У **третьому розділі** розроблено метод, що підвищує стійкість та якість роботи САР шляхом розділення в часі функцій компенсації збурення та стабілізації. Для цього запропонована двоканальна структура формування керуючого сигналу. Керуючий вплив формується за допомогою двох паралельних каналів, один з яких є швидкодіючим ПІ-регулятором, а інший – динамічним коректором із запізнюванням, причому сигнал корегуючого каналу віднімається від сигналу швидкодіючого каналу. Структура регулятора з динамічним коректором (ПІ-К) зображена на рис. 4.

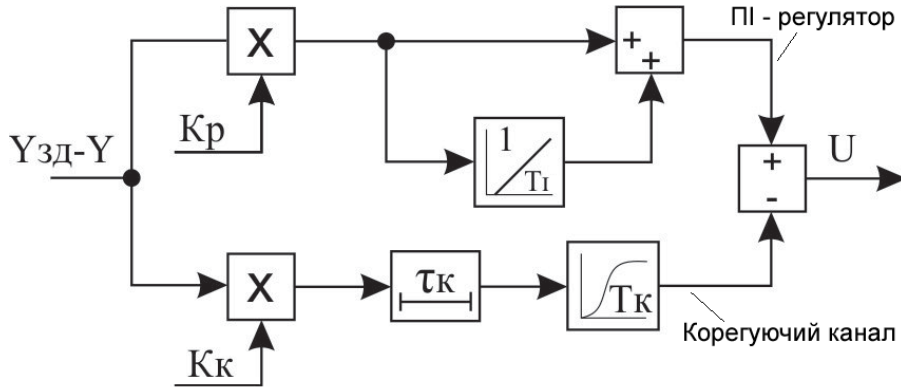


Рис. 4. Загальна структурна схема ПІ-К регулятора
де $Y_{зд}$, Y - задане і поточне значення регульованої змінної;
 K_k , τ_k , T_k - коефіцієнт передачі, транспортне запізнювання і постійна часу корегуючого каналу відповідно, U – сигнал керування.

У корегуючому каналі дозволяється застосовувати різні набори динамічних ланок, залежно від порядку об'єкта керування. Так, передатна функція ПІ-К регулятора для об'єктів першого порядку має вигляд:

$$W_{PI-K}(p) = \frac{K_{PI} \cdot (T_i \cdot p + 1)}{T_i \cdot p} - K_k \cdot e^{-p\tau_k} \quad (6)$$

Так як за задумом корегуючий канал повинен відображати властивості об'єкта керування, то підвищення порядку об'єкта призводить до підвищення порядку корегуючого каналу шляхом введення додаткової аперіодичної ланки, передатна функція ПІ-К регулятора для об'єктів більш високих порядків має вигляд:

$$W_{PI-K}(p) = \frac{K_{PI} \cdot (T_i \cdot p + 1)}{T_i \cdot p} - \frac{K_k}{T_k \cdot p + 1} \cdot e^{-p\tau_k} \quad (7)$$

Розроблено динамічну модель САР з використанням еквівалентного об'єкта (4), проведено імітаційне моделювання, досліджені перехідні процеси та запаси стійкості системи регулювання з динамічним коректором в порівнянні зі штатною системою регулювання у заданому діапазоні змін параметрів об'єкта. Показано, що запропонована структура здатна забезпечити високу якість перехідних процесів та стабільну роботу системи регулювання на всьому

діапазоні зміни навантаження. Для оцінки запасів стійкості у частотній області зображені (рис. 5) годографи АФЧХ розімкнених систем регулювання зі стандартним ПІ-регулятором та ПІ-регулятора з динамічним коректором. Мінімальні відстані від точки $(-1;j0)$ до годографів, що характеризують комплексний запас стійкості зображені у вигляді радіус-векторів $d_{\text{ПІ}}$ та $d_{\text{ПІ-К}}$. Порівняння запасів стійкості систем по амплітуді, фазі та мінімальній відстані приведені у табл. 2.

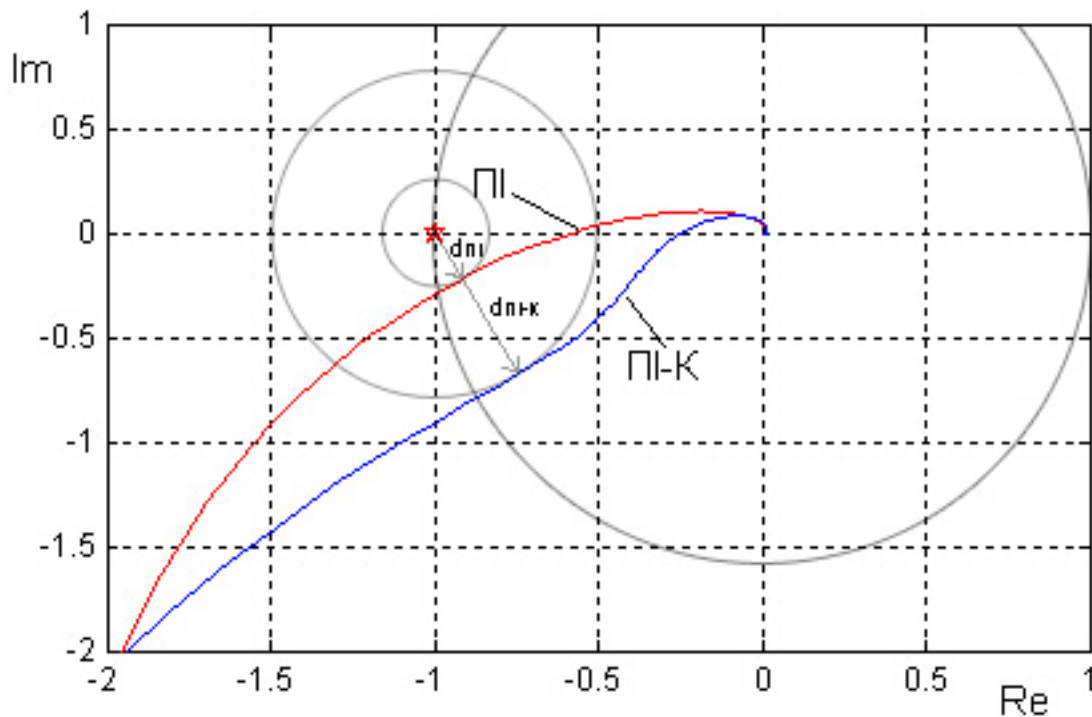


Рис. 5. Годографи АФЧХ розімкнених системи при мінімальному навантаженні

Табл. 2. - Запаси стійкості розімкнених систем із ПІ-регулятором і з коректором

Системи	Запас по амплітуді, g_m	Запас по фазі, φ_m	Запас по відстані, d
	Номінальне навантаження ($K_{об}=2.5$)		
ПІ	2.45 ($\omega_{180}=0.0211$)	35.8821° ($\omega_0=0.0100$)	0.47 ($\omega_{max}=0.0124$)
ПІ-К	5.16 ($\omega_{180}=0.0338$)	39.8756° ($\omega_0=0.0093$)	0.64 ($\omega_{max}=0.0107$)
	Мінімальне навантаження ($K_{об}=4.6$)		
ПІ	1.66 ($\omega_{180}=0.0211$)	18.8646° ($\omega_0=0.0147$)	0.21 ($\omega_{max}=0.0164$)
ПІ-К	4.54 ($\omega_{180}=0.0338$)	42.8462° ($\omega_0=0.0134$)	0.5 ($\omega_{max}=0.0273$)

Введення каналу динамічної корекції суттєво збільшує всі запаси стійкості системи, що дозволяє, при потребі, підвищити коефіцієнт підсилення основного ПІ-регулятора, зменшивши тим самим динамічне відхилення перехідного процесу.

Для порівняння двох систем також проаналізовані функції чутливості, що відображають залежності динамічних властивостей системи від параметричних та координатних відхилень при різних частотах. Так як для пароводяного тракту головною задачею САР є стабілізація параметра, використана наступна

функція чутливості, яка характеризує реакцію замкненої системи на збурення:

$$S = \frac{1}{1 + W_p W_{об}} \quad (8)$$

Графіки АЧХ функції чутливості (8) у режимі номінального ($K_{об}=2.5$) і мінімального ($K_{об}=4.6$) навантаження зображені на рис. 6. У діапазоні частот $[10^{-2} \ 10^{-1}]$ рад/с, характерних для інерційних теплоенергетичних контурів керування, регулятор з коректором має значно меншу чутливість до збурень, ніж стандартний ПІ-регулятор.

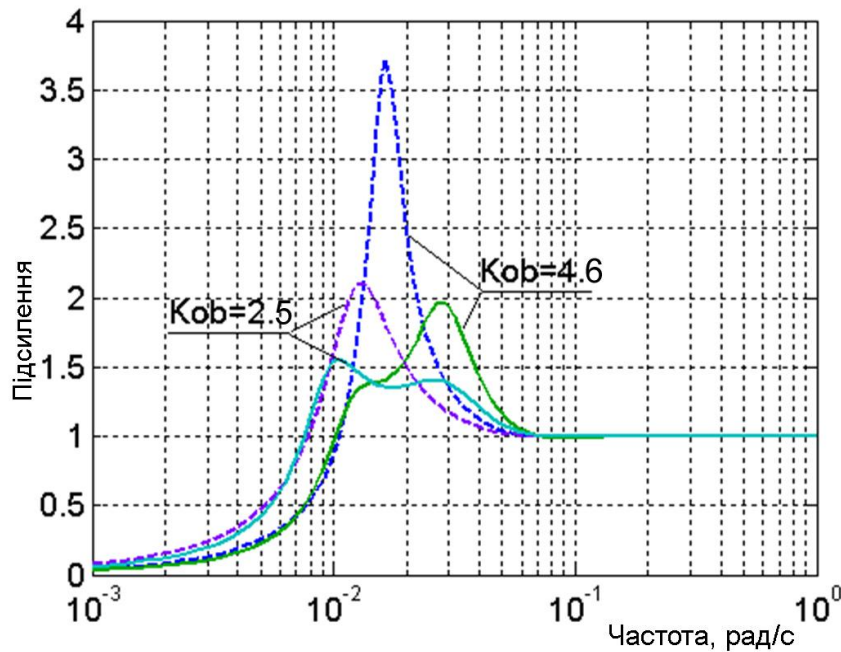


Рис. 6. Функції чутливості ПІ-регулятора (пунктир) і ПІ-К регулятора (суцільна лінія) у режимі номінального ($K_{об}=2.5$) і мінімального ($K_{об}=4.6$) навантаження

Встановлено характер впливу кожного з параметрів ПІ-регулятора і коректора на різні показники якості. Зменшення навантаження (зростання $K_{об}$) призводить до монотонного зниження інтегральних, скалярних показників і незначні зміни частотних показників стійкості (система стійка у всьому діапазоні $K_{об}$). Всі інтегральні показники мають пологий мінімум у діапазоні змін $K_{корекції} = (0.4-0.7) \cdot K_{ПІ}$, а максимум демпфірування (мінімум динамічного відхилення) на значенні $K_{корекції} = 0.9 \cdot K_{ПІ}$, що корелюється із максимумом запасу фази φ_m . Постійні часу коректора мають схожий вплив на загальну картину показників якості перехідного процесу, так як фактично визначають момент введення в дію корегуючого каналу, який у свою чергу визначається сталими часу об'єкта керування. Всі інтегральні показники і час регулювання мінімізуються в районі $\tau_K = 0.15(\tau_{об} + T_{об})$, що співпадає із максимумом демпфірування та максимумами запасів по фазі. Встановлено залежності параметрів коректора від налаштувань ПІ-регулятора та параметрів об'єкта, що були покладені в основу розробки методик налаштування.

Розроблено алгоритм та аналітичну методику налаштування параметрів контуру динамічної корекції, яка забезпечує заданий запас стійкості по мінімальній відстані R_{min} . Методика базується на геометричній корекції в частотній області форми годографа розімкненої системи (рис. 7) в точці, найближчій до критичної точки $(-1;j0)$.

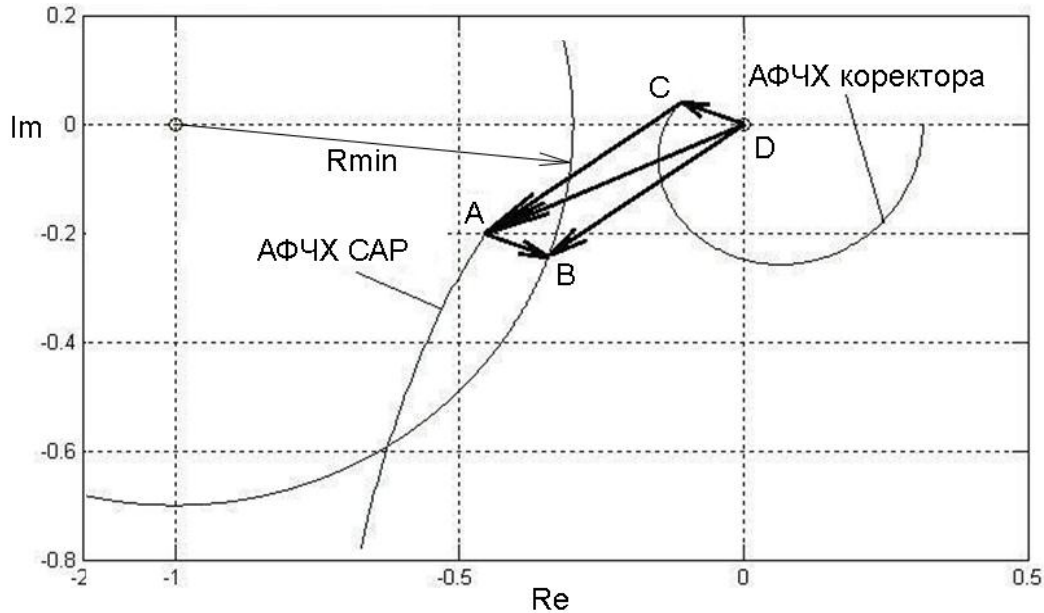


Рис.7. Вплив корегувальної АФЧХ на АФЧХ розімкненої системи

На деякій частоті ω_n годограф АФЧХ коректора (CD) знаходиться в II-й чверті, а годограф АФЧХ РС (DA) – в III-й. Різниця векторів DA і DC є вектор СА, який у свою чергу є годографом АФЧХ системи з коректором. Параметр коректора τ визначає швидкість обертання годографа CD, тобто фактично відповідає за кут суміщення корегувальної АФЧХ і АФЧХ РС. Параметр коректора K визначає модуль корегувальної АФЧХ.

Корегувальна АФЧХ формується з добутку функцій об'єкта та коректора:

$$W_{КОРЕГ}(p) = W_{ОБ}(s) K \cdot e^{-\tau p}, \quad (9)$$

Виокремимо дійсну та уявну частини $W_{КОРЕГ}(j\omega)$:

$$\begin{aligned} W_{КОРЕГ}(j\omega) &= K \cdot (Re_{ОБ}(\omega) + j \cdot Im_{ОБ}(\omega)) \cdot (\cos(\tau\omega) - j \sin(\tau\omega)) = \\ &= K \cdot (Re_{ОБ}(\omega) \cdot \cos(\tau\omega) + Im_{ОБ}(\omega) \cdot \sin(\tau\omega)) + \\ &\quad + j \cdot K \cdot (Im_{ОБ}(\omega) \cdot \cos(\tau\omega) - Re_{ОБ}(\omega) \cdot \sin(\tau\omega)). \end{aligned} \quad (10)$$

Тангенс кута нахилу вектора АВ, що знаходиться у II-й чверті:

$$tg(\tau\omega) = \frac{tg \alpha Re_{ОБ}(\omega) + Im_{ОБ}(\omega)}{Re_{ОБ}(\omega) - tg \alpha Im_{ОБ}(\omega)} \quad (11)$$

Звідси формула для розрахунку сталої часу запізнювання коректора:

$$\tau = \frac{1}{\omega} \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{Re}_{OB}(\omega) + \operatorname{Im}_{OB}(\omega)}{\operatorname{Re}_{OB}(\omega) - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{Im}_{OB}(\omega)} \right) + \frac{\pi}{\omega} n \quad (12)$$

Для визначення коефіцієнта підсилення коректора змістимо початок годографу АФЧХ з коректором з точки $(0; j0)$ в точку $(-1; j0)$ і отриману передатну функцію опишемо як η :

$$\eta(p) = 1 + W_P W_{OB} - W_{OB} \cdot K \cdot e^{-\tau \cdot p} \quad (13)$$

Позначимо:

$$W^* = 1 + W_P W_{OB} \quad \text{та} \quad W^\wedge = W_{OB} \cdot e^{-\tau \cdot p} \quad (14)$$

Далі, виділивши дійсну та уявну частини, а також прийнявши дійсну частину η за радіус кола зміщення R_{min} , яким ми задаємося виходячи з вимог до запасу стійкості, отримуємо формулу для розрахунку коефіцієнта підсилення коректора:

$$K = \frac{\operatorname{Re}(\omega)^* \operatorname{Re}(\omega)^\wedge + \operatorname{Im}(\omega)^* \operatorname{Im}(\omega)^\wedge}{A(\omega)^\wedge^2} \pm \frac{\sqrt{\left[\operatorname{Re}(\omega)^* \operatorname{Re}(\omega)^\wedge + \operatorname{Im}(\omega)^* \operatorname{Im}(\omega)^\wedge \right]^2 - \left[A(\omega)^\wedge^2 \right] \cdot \left[A(\omega)^*{}^2 - \eta^2 \right]}}{A(\omega)^\wedge^2} \quad (15)$$

Використання цих складних аналітичних формул для практичних цілей не є зручним, що викликає потребу у створенні експрес-методик налаштування та розробці програмних засобів для оптимального параметричного синтезу САР з ПІ-К регуляторами.

Інтерфейс розробленого програмного комплексу зображено на рис. 8. Спеціально розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення дозволяє моделювати перехідні процеси для об'єктів різних порядків та структур у замкнених системах регулювання з ПІ– та ПІ-К – регуляторами, проводити оптимізацію параметрів регулятора по набору інтегральних критеріїв якості та по прямим показникам, таким як динамічне відхилення, час перехідного процесу та ступінь затухання коливань. Також є можливість накладати графіки перехідних процесів, досліджувати системи регулювання у частотній області та порівнювати годографи АФЧХ, виводити графіки сигналу керування та автоматично будувати номограми залежності налаштувань регулятора від параметрів об'єкта керування. Реалізована можливість роботи з відкритими зовнішніми моделями САР, створеними у Matlab, що дозволяє проводити

дослідження систем з об'єктами будь-якого порядку та модифікувати їх структуру.

Модуль побудови номограм варіює вибраний параметр об'єкта керування (K , T , τ) у заданих межах, для кожного варіанту складається динамічна модель САР та проводиться параметрична оптимізація регулятора з коректором за вибраним критерієм (за замовченням ІТАЕ). Оптиміальні налаштування регулятора фіксуються на графіку. Реалізовано побудову номограм для коефіцієнту підсилення ПІ-регулятора форсуючого каналу, коефіцієнта підсилення коректора та сталої часу запізнювання коректора.

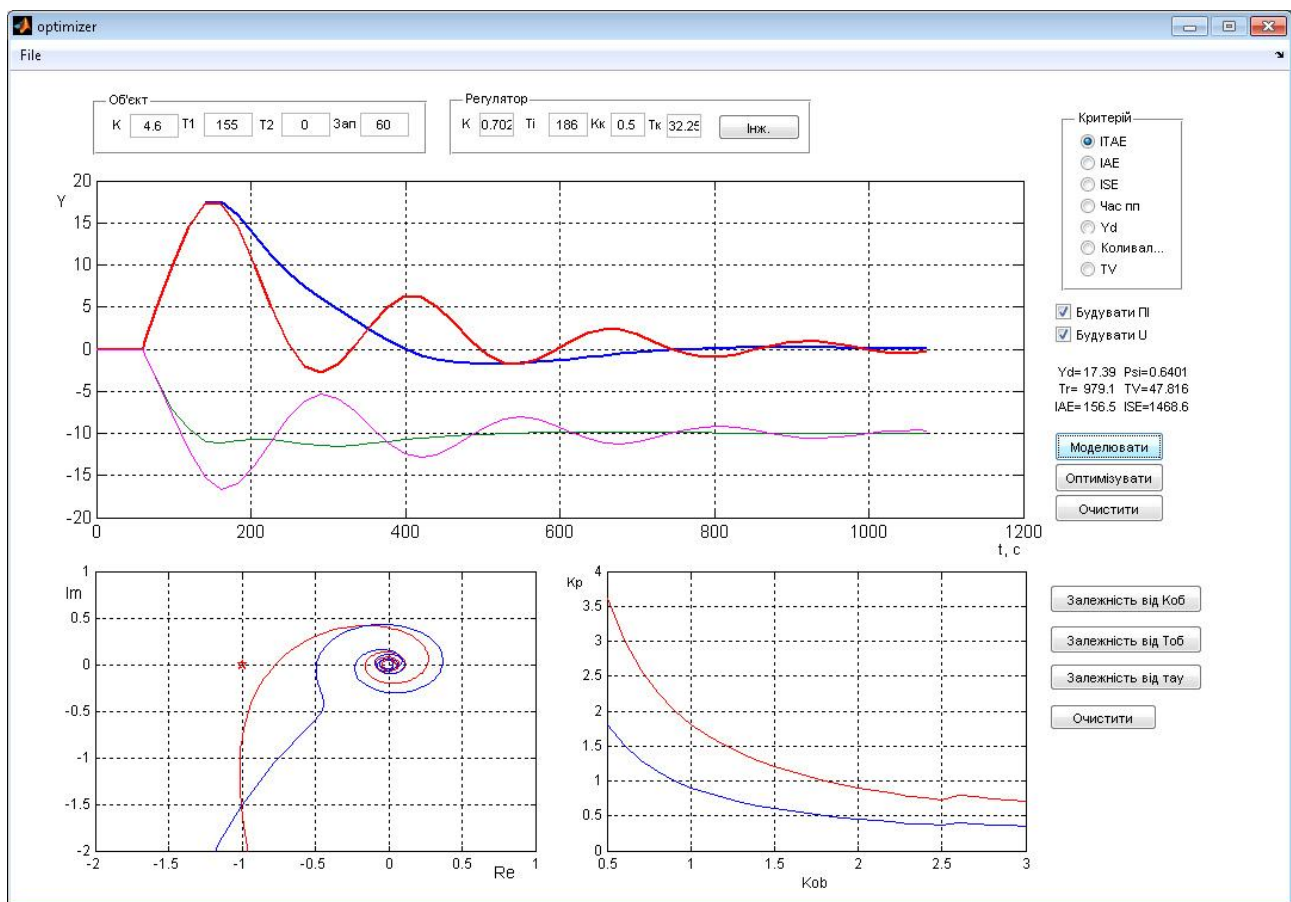


Рис. 8. Інтерфейс програмного комплексу для оптимізації САР

Для діапазонів $K_{об}$ від 0.5 до 5, $T_{об}$ від 50 до 200 с, $\tau_{об}$ від 5 до 100 с побудовано номограми параметрів ПІ-регулятора та коректора від параметрів об'єкта керування за критерієм оптимізації ІТАЕ. Показано, що часова стала коректора T_k прямо пропорційна величині $T_{об} + \tau_{об}$ і практично не залежить від $K_{об}$. Коефіцієнт підсилення коректора K_k завжди менший від коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора, прямо пропорційний до відношення $T_{об}/\tau$ і обернено пропорційний до $K_{об}$. Використовуючи побудовані номограми розроблено експрес-формули налаштування регулятора з динамічним коректором для об'єктів першого та другого порядків (див. табл. 3). Для спрощення процесу налаштування САР для об'єктів другого порядку параметри запізнювання та стала часу коректора рекомендовано обирати рівними.

Табл. 3. Експрес-формули налаштування ПІ-К регулятора

Для об'єктів 1-го порядку	Для об'єктів 2-го порядку
$K_p = \frac{0.7 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 0.55 \cdot (T_{об} + \tau_{об})$ $K_\kappa = 0.4 \cdot K_p$ $\tau_\kappa = 0.1 \cdot T_{об} + 0.25 \cdot \tau_{об}$	$K_p = \frac{0.55 \cdot (T_{1об} + T_{2об})}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 0.8 \cdot (T_{1об} + T_{2об} + \tau_{об})$ $K_\kappa = 0.5 \cdot K_p$ $\tau_\kappa = T_\kappa = 0.06 \cdot (T_{1об} + T_{2об}) + 0.2 \cdot \tau_{об}$

Проведене порівняння аналітичної та експрес методик налаштування регулятора з коректором демонструє однотипність результатів, відносне інтегральне відхилення перехідних процесів не перевищує 4%. Обидві методики можуть ефективно використовуватися для синтезу САР.

Порівняльне дослідження роботи ПІ-К та ППІ– регуляторів показало, що по каналу завдання ППІ–регулятор має на 5% менше перерегулювання, при цьому по каналу збурення ПІ-К регулятор має на 14% менше динамічне відхилення, ступінь затухання коливань в умовах одночасного збільшення $K_{об}$ та $\tau_{об}$ для системи з ПІ-К –регулятором на 11% вищий, ніж для системи з ППІ – регулятором.

У четвертому розділі на основі розробленого методу динамічної корекції вдосконалено САР наступних інерційних контурів:

- температурного режиму пароводяного тракту;
- температури перегрітої пари на виході з котлоагрегата.

Результати моделювання перехідних процесів на прикладі САР температурного режиму пароводяного тракту представлені на рис. 9.

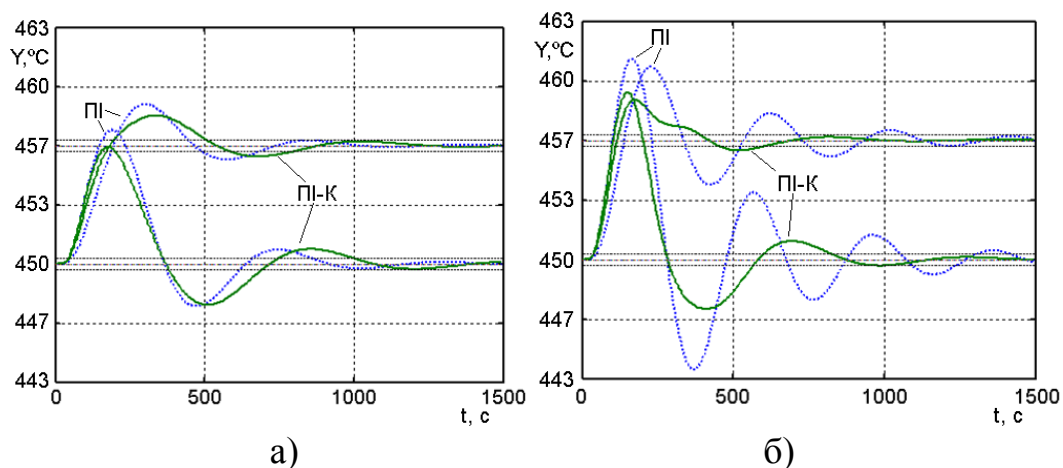


Рис. 9. Перехідні процеси по каналах завдання (верхні криві) і збурення (нижні криві) при ступінчастому впливі у двох режимах навантажень:
а) номінальному 300 МВт; б) мінімальному 225 МВт

Розроблена система регулювання температурного режиму забезпечує перевагу у відносних значеннях всіх основних критеріїв якості (інтегральні критерії ISE, IAE, ITSE, ITAE, динамічний викид, ступінь затухання, час регулювання) перехідних процесів при зміні режиму роботи з номінального ($K_{об} = 2.5$) до мінімального ($K_{об} = 4.6$) навантаження. Час регулювання при цьому не перевищує 1000 с, а динамічне відхилення знаходиться у межах 10 °С.

Надважливим параметром для роботи енергоблоку в цілому є температура перегрітої пари на виході з котлоагрегата перед подачею в турбіну. Від точності його підтримання залежить стабільність роботи турбіни та тривалість безремонтної експлуатації. Для регулювання температури перегрітої пари застосовується каскадна структура, ПІ-К регулятор застосовано в стабілізуючому та корегуючому контурах. Температура регулюється впорском води у паропровід. Особливістю даного контуру є суттєва зміна коефіцієнта передачі об'єкта в залежності від навантаження та витрати охолоджуючої води, а допустиме відхилення температури – до 6 °С. Застосування ПІ-К регуляторів забезпечило зменшення динамічного відхилення на 16% та збільшення ступеня затухання на 10%.

Підвищення показників якості перехідних процесів в контурах регулювання температур пароводяного тракту призводить до росту економічності роботи даного технологічного об'єкта: зменшення сумарного переміщення регулюючого органа та витрати палива, зменшення витрати води на охолодження первинної пари; поліпшення умов роботи металу трубних поверхонь нагріву в топці, так як усунені небажані коливання температури пари на виході й у проміжних точках пароводяного тракту, що становили небезпеку для найбільш термічно напружених поверхонь паропроводу. Разом з підвищенням якості регулювання, досягається також додатковий позитивний ефект у вигляді зменшення зносу елементів обладнання виконуючих пристроїв (клапанів, приводів та ін.) за рахунок їх менш частого переміщення.

Технічна реалізація пропонованого динамічного коректора не потребує додаткових датчиків, а канали регулювання можуть бути реалізовані програмними засобами АСУТП. Виконана перевірка ефективності розробленого методу динамічної корекції на промисловому об'єкті – Трипільській ТЕС, де була проведена модернізація АСУТП з переходом на сучасну промислову цифрову апаратуру. Запропоноване рішення було впроваджено в контурі регулювання температурного режиму енергоблоку №2. У результаті реалізації нової структури регулятора на 15% зменшився динамічний викид регульованої змінної в перехідних режимах, загальне переміщення виконавчих механізмів при використанні коректора стало меншим на 20%, що сприяє подовженню терміну експлуатації обладнання. Система регулювання зберігає стійкість при зміні навантаження в усьому робочому діапазоні та задовольняє вимогам до заданих показників якості перехідних процесів.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива наукова задача – підвищення якості регулювання параметрів інерційних контурів котлоагрегата теплової станції, що функціонує в маневрених режимах зміни навантаження, шляхом вдосконалення структури алгоритму регулювання.

1. Проведено аналіз відомих підходів та структур систем керування для інерційних об'єктів, показані недоліки відомих рішень для практичного застосування на теплоенергетичному обладнанні, що полягають у чутливості систем до зміни навантаження агрегатів та складності проведення адаптації.

2. На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі інерційних контурів регулювання температурного режиму пароводяного тракту, що враховують весь робочий діапазон навантажень котлоагрегата.

3. Розроблено метод підвищення ефективності роботи САР, що базується на розділенні у часі задач компенсації відхилення та стабілізації, для цього запропонована двоканальна структура регулятора з введенням ланки запізнювання, що дозволяє отримати регулятор з підвищеним запасом стійкості, який на відміну ПІД нечутливий до завад вимірювання.

4. Розроблено аналітичну методику налаштування регулятора, засновану на корекції форми годографу АФЧХ розімкненої системи, яка дозволяє синтезувати САР з заданим запасом стійкості по мінімальній відстані від точки $(-1;j0)$ до годографу. Для зручного використання під час пуско-налагоджувальних робіт створено спрощену експрес-методику налаштування для об'єктів першого та другого порядків, що забезпечує мінімум інтегрального абсолютного критерію якості перехідних процесів.

5. Запропоновано та досліджено варіанти реалізації ПІ-К алгоритму у складі багатоконтурних систем регулювання котлоагрегата. Розглянуто трьохімпульсну САР регулювання температурного режиму пароводяного тракту з введенням похідних від проміжних інформаційних сигналів та каскадну САР температури перегрітої пари. Застосування динамічного коректора забезпечило необхідний запас стійкості та підвищену якість перехідних процесів у порівнянні зі штатними ПІ-регуляторами в умовах зміни навантаження.

6. Застосування ПІ-К регулятора у інерційних контурах регулювання котлоагрегата призводить до підвищення ступеня затухання перехідних процесів, зменшує динамічне відхилення та сумарне переміщення регулюючого органу у порівнянні з класичними рішеннями, що забезпечує економію енергоресурсів та подовження періоду міжремонтної експлуатації металу паропроводів та супутнього устаткування.

7. Запропоновану структуру регулятора з коректором впроваджено в складі АСУТП Трипільської ТЕС на контурі регулювання температурного режиму пароводяного тракту енергоблоку №2. Модернізована САР довела свою ефективність забезпечивши зменшення на 15% динамічного відхилення та на 20% сумарного переміщення виконавчих механізмів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фоменко Б.В. Підвищення ефективності систем автоматичного регулювання за рахунок врахування обмежень керованого сигналу [Текст] / Б.В. Фоменко, О.В. Степанець, О.С. Бунке // Вестник национального технического университета "ХПИ", Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях". – 2010. – № 57. – С. 177-183.

Запропоновано використання контуру динамічної корекції в системі керування з врахуванням обмежень, досліджено роботу вказаного регулятора у порівнянні з типовими структурами.

2. Бунке О.С. Дослідження методів апроксимації кривих розгону для синтезу САР [Текст] / О.С. Бунке, А.В. Полухович // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2012. – №2/10(56). – С. 39-41.

Проаналізовано методи обробки розгінних характеристик, досліджено алгоритми апроксимації.

3. Ковриго Ю.М. Повышение эффективности регулирования котлов путем учета технологических ограничений [Текст] / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – №2. – С. 58–63.

Розроблено систему автоматичного керування, що враховує обмеження на керування та використовує динамічну корекцію керуючого впливу.

4. Ковриго Ю.М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора [Текст] / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – №10. – С. 43 – 49.

Запропоновано метод підвищення ефективності системи регулювання тепловим навантаженням, досліджено роботу системи в маневрених режимах.

5. Ковриго Ю.М. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ та ПІД регуляторів [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, О.С. Бунке // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №3/3 (63). – С. 58-63.

Досліджено методи підвищення стійкості систем регулювання на прикладі контура регулювання температури аеросуміші за вугільним млином.

6. Ковриго Ю.М. Модернізація САР теплового навантаження з використанням методу динамічної корекції [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Наукові праці Національного університету харчових технологій (НУХТ) . – 2013. – № 48. – С. 29-36.

Розроблено робастну систему автоматичного керування тепловим навантаженням, досліджено частотні критерії якості.

7. Ковриго Ю.М. Обеспечение робастного управления в системах регулирования инерционными теплоэнергетическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, О.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2014. – № 3. – С. 9–14.

Запропоновано метод підвищення стійкості систем регулювання, досліджено роботу динамічного коректора в маневрених режимах функціонування об'єкта.

8. Патент на корисну модель №44799 Україна. Регулюючий мікропроцесорний контролер / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, І.М. Голінко, О.С. Бунке; заявл. 29.05.2009, опубл. 12.10.2009, бюл. № 19.

9. Патент на корисну модель №54042 Україна, Універсальний мікропроцесорний контролер / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, І.М. Голінко, О.С. Бунке; заявл. 23.04.2010, опубл. 25.10.2010, бюл. № 20.

10. Патент на корисну модель №67725 Україна. Спосіб автоматичного регулювання параметрів інерційних об'єктів із запізненням / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, О.С. Бунке; заявл. 27.05.2011, опубл. 12.03.2012, бюл. № 5.

11. Бунке О.С. Підвищення запасу стійкості систем регулювання на основі ПІ-регуляторів [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 19-23 квітня 2010 : тези доп. — К.: КПІ, 2010. — С. 294.

Запропоновано метод підвищення стійкості систем регулювання.

12. Бунке О.С. Досвід застосування ПІ-регулятора з коректором для підвищення стійкості САР [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 18-22 квітня 2011 : тези доп. — К.: КПІ, 2011. — С. 268.

Представлено результати впровадження регулятора з динамічним коректором в контурі регулювання тепловим навантаженням котлоагрегата.

13. Бунке О.С. Програмний комплекс для ідентифікації об'єктів керування на базі табличних даних [Текст] / О.С. Бунке, А.В. Полухович // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, 18-22 квітня 2011: тези доп. — К.: КПІ, 2011. — С. 302.

Наведені результати дослідження методів обробки перехідних характеристик, представлено програмний комплекс автоматизованої апроксимації передатними функціями.

14. Бунке О.С. Підвищення запасу стійкості систем регулювання на основі ПІ-регуляторів методом динамічної корекції [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Автоматика-2011 : XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, 28-30 вересня 2011 р. : тези доп. — Л., 2011. — С. 263.

Досліджено метод динамічної корекції керуючого впливу, представлені результати моделювання системи в маневрених режимах роботи.

15. Бунке А.С. Повышение устойчивости систем управления инерционными объектами с использованием динамического корректора [Текст] / Ю.М. Ковриго, А.С. Бунке // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: междунар. науч.-прак. конф., 11 кв. 2012р. : тези доп. — Мінськ, 2012. — С. 127.

Запропоновано метод підвищення якості регулювання контурів із значим транспортним запізнюванням.

16. Бунке О.С. Комплекс автоматизованої ідентифікації об'єктів керування [Текст] / В.Ф. Мисак, О.С. Бунке, А.В. Полухович // Матеріали Х

міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів, 17-20 квітня 2012 : тези доп. — К.: КПІ, 2012. — С. 29.

Розроблено алгоритмічне забезпечення програмного комплексу для отримання передатних функцій.

17. Бунке О.С. Модернізація САР теплового навантаження з використанням методу динамічної корекції [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Автоматика-2012 : XIX міжнародна конференція з автоматичного управління. 26–28 вересня, 2012 р. : тези доп. — Київ., 2012. — С. 158.

Наведені дослідження щодо підвищення ефективності та робастності системи регулювання при зміні навантаження котлоагрегата.

18. Бунке О.С. Метод динамічної корекції АФЧХ систем керування [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів. «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 16-19 квітня 2013 р. : тези доп. — К.: КПІ, 2013. — С. 14.

Наведені дослідження частотних характеристик систем керування, запропоновано метод підвищення комплексного запасу стійкості.

19. Бунке О.С. Метод динамічної корекції частотних характеристик систем керування інерційними об'єктами [Текст] / Ю.М. Ковриго, О.С. Бунке // Автоматика-2013 : XX міжнародна конференція з автоматичного управління. 25–27 вересня, 2013 р. : тези доп. — Миколаїв. — С.157.

Представлено результати імітаційного моделювання системи з динамічним коректором частотних характеристик у маневрених режимах роботи котлоагрегата.

АНОТАЦІЯ

Бунке О.С. Автоматизація процесів керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції із використанням методу динамічної корекції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» МОН України, Київ, 2014.

Дисертація присвячена модернізації САР інерційних контурів пилосугільних котлоагрегатів ТЕС шляхом введення додаткового паралельного контуру динамічної корекції, що підвищує швидкодію без зменшення стійкості системи при зміні параметрів об'єкта.

Для котлоагрегата потужністю 300 МВт проведена ідентифікація контурів з регулювання температурного режиму пароводяного тракту, отримано математичні моделі у вигляді передатних функцій. Показано, що штатні САР на базі ПІ-регуляторів не здатні забезпечити необхідної якості регулювання при зміні навантаження.

Розроблена нова структура регулятора з динамічним коректором та методики його налаштування на задані показники якості. Розроблено програмне забезпечення для моделювання та оптимального налаштування САР. Удосконалено САР інерційних контурів котлоагрегата шляхом застосування регулятора

з динамічним коректором, виконано порівняння перехідних процесів, приведені таблиці показників якості регулювання. Результати роботи впроваджені на діючому енергоблоці Трипільської ТЕС м. Українка.

Ключові слова: котлоагрегат, система регулювання, ТЕС, динамічна корекція, запас стійкості, ПІ-регулятор.

АННОТАЦИЯ

Бунке А.С. Автоматизация процессов управления инерционными контурами котлоагрегата тепловой электростанции с использованием метода динамической коррекции. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» МОН Украины, Киев, 2014.

Диссертация посвящена модернизации САР инерционных контуров пылеугольных котлоагрегатов ТЭС путем ввода дополнительного параллельного контура динамической коррекции в структуру регуляторов, что повышает быстродействие без уменьшения устойчивости системы и обеспечивает робастность САР при изменении параметров объекта. Основным возмущением для контуров регулирования котлоагрегата является изменение нагрузки энергоблока, так коэффициенты усиления могут изменяться в 1,5-2 раза, а запаздывание на 20% относительно номинального режима работы.

Для котлоагрегата мощностью 300 МВт проведена идентификация контуров регулирования температурного режима пароводяного тракта, получены математические модели в виде передаточных функций для диапазона нагрузок от 225 до 300 МВт. Исследованы критерии качества переходных процессов для проведения процедур оптимизации настроек регуляторов, оптимальным выбран интегральный абсолютный критерий с учетом времени (ИТАЕ). Показано, что стандартные ПИ-регуляторы не обеспечивают требуемого качества регулирования при изменении нагрузки, так как они настраиваются либо на высокий запас устойчивости, при этом случаются затянутые переходные процессы и большое динамическое отклонение, либо на быстрое подавление возмущений, что приводит к повышенной колебательности и недостаточному запасу устойчивости. Сделан вывод, что для разрешения данного противоречия необходимо усовершенствовать структуру регулятора.

Разработан метод, который повышает устойчивость и качество работы САР путем разделения во времени функций компенсации возмущения и стабилизации. Для этого предложена двухканальная структура формирования управляющего сигнала. Управляющее воздействие формируется с помощью двух параллельных каналов, один из которых является быстродействующим ПИ-регулятором, а другой - динамическим корректором с запаздыванием, причем сигнал корректирующего канала вычитается из сигнала быстродействующего канала. Для реализации разработанного метода создана структура регулятора с динамическим корректором, а также аналитическая методика оптимальной

настройки его параметров на заданный запас устойчивости системы, которая базируется на геометрической коррекции годографа АФЧХ разомкнутой системы. Приведена сравнительная таблица запасов устойчивости определяемых в частотной области для системы управления до и после введения корректора.

Разработано программное обеспечение для моделирования, оптимальной настройки и исследования систем регулирования, которое позволяет проводить оптимизацию САР по ряду интегральных и прямых показателей качества, исследовать работу систем в частотной области и получать номограммы зависимостей настроек регулятора от параметров объекта управления. Получены экспресс-формулы для настройки регулятора для объектов первого и второго порядков, рассчитанные на минимизацию интегрального абсолютного критерия качества переходных процессов.

Проведено усовершенствование САР инерционных контуров котлоагрегата разных структур (трехимпульсной с дифференциаторами и каскадной) путем введения дополнительного канала динамической коррекции в структуру регуляторов, выполнено сравнение переходных процессов для систем с динамическим корректором и штатных систем на базе ПИ-регуляторов, приведены таблицы показателей качества регулирования. Результаты работы внедрены на действующем энергоблоке Трипольской ТЭС г. Украинка, испытания на котором показали эффективность предложенного решения.

Ключевые слова: котлоагрегат, система регулирования, ТЭС, динамическая коррекция, запас устойчивости, ПИ-регулятор.

SUMMARY

Bunke Alexander S. Automation of control process of power plant boiler's inertial loops using the method of dynamic correction. – Manuscript.

Dissertation for a candidate degree by specialty 05.13.07 - automation of processes control. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2014.

The thesis is devoted to upgrading ACS of coaldust TPP boilers inertial circuits by using extra parallel channel of dynamic correction that improves performance without reducing the stability of the system when the object parameters changing.

Identification of the 300 MW boilers steam temperature regulation loop was performed, mathematical models in the form of transfer functions for a load range from 225 to 300 MW were obtained. It is shown that standard ACS with PI regulator is not able to provide the required quality of regulation at the load changes.

A new controller structure with dynamic corrector and methods of its tuning were developed. Software for simulation and optimal tuning of ACS was developed.

Boiler unit ACS for inertial loops was upgraded by applying controller with dynamic corrector. Comparisons of transitional processes for systems with dynamic corrector and PI controllers are shown. The solutions of dissertation implemented at the Tripoli TPP power unit.

Keywords: boiler, control system, dynamic correction, stability, PI controller.

Підписано до друку 17.09.2014 р. Формат 60х90 1/16.
Друк офсетний. Папір друкарський. Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 1709/01 від 17 вересня 2014 р.

Підприємство «УВОІ «Допомога» УСІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію №31245580
03056, м. Київ, пров. Політехнічний, 6, корп. 5 (КПІ)
Тел.: 277-80-08.