

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

На правах рукопису

Баган Тарас Григорович

УДК 621.181.1:681.5

**РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ
КОТЛОАГРЕГАТА ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БАЗІ
ВНУТРІШНЬОЇ МОДЕЛІ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Ковриго Юрій Михайлович
кандидат технічних наук, професор

Київ – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТА	11
1.1. Опис прямооточного котлоагрегата.....	11
1.1.1.Характеристика прямооточного котлоагрегата	11
1.1.2.Вплив зміни навантаження на роботу систем керування котлоагрегата.....	16
1.1.3.Вимоги до систем автоматичного регулювання прямооточного котла	19
1.2. Способи керування об'єктами зі змінними параметрами.....	20
1.3. Огляд основних положень робастної теорії	25
1.3.1. Типи невизначеностей при розгляді робастних систем.....	28
1.3.2.Робастність систем з запізненням	33
1.3.3.Керування інерційними об'єктами з запізнюванням за допомогою предикторів.....	36
1.3.4.Основні положення теорії H_∞ -керування	39
1.3.5.Методи налаштування регуляторів з використанням моделі об'єкта управління	42
1.4. Висновки та постановка задачі дослідження	47
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДІЛЯНОК ВОДО-ПАРОВОГО ТРАКТУ КОТЛА	49
2.1. Феноменологічна модель водо-парового тракту котла.....	49
2.2. Ідентифікація динамічних характеристик ділянок водо-парового тракта котла по експериментальним даним	52
2.3. Перевірка моделей на адекватність.....	60
2.4. Апроксимація часу запізнення.....	62
2.5. Вибір критерію оптимізації.....	64
2.6. Висновки до Розділу 2	67

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА З	
ВНУТРІШНЬОЮ МОДЕЛЛЮ НА БАЗІ H_∞ -НОРМИ.....	69
3.1. Параметризація регулятора з внутрішньою моделлю.....	69
3.2. Вибір фільтра.....	74
3.3. Проектування H_∞ -ІМС-регулятор для об'єкта першого порядку з	
запізнюванням	77
3.4. Розробка H_∞ -ІМС-регулятора для об'єкта другого порядку з	
запізнюванням	80
3.5. Розробка H_∞ -ІМС-регулятора для об'єкта без самовирівнювання з	
запізнюванням	81
3.6. Синтез робастної системи з регулятором з внутрішньою моделлю з	
двома ступенями свободи.....	83
3.7. Робастність і кількісні показники якості	86
3.8. Визначення меж робастності	98
3.9. Дослідження роботи запропонованих регуляторів на прикладі	
локальних систем керування котлоагрегатом.....	102
3.9.1. АСК температури за НРЧ.....	102
3.9.2. АСК температури за ВРЧ.....	108
3.10. Висновки до Розділу 3	114
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ РІШЕНЬ	
НА БАЗІ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕХНІКИ	116
4.1. Апаратне забезпечення систем автоматизованого керування.....	116
4.2. Властивості інтегрованого середовища розробки прикладного	
проекта автоматизації	117
4.3. Програмно-технічна реалізація інерційних контурів регулювання.....	119
4.3.1. Використання бази даних в роботі контролера	123
4.3.2. Приклад застосування H_∞ -ІМС-регулятора в роботі контролера	126
4.4. Вдосконалення роботи каскадної системи регулювання.....	127
4.5. Економічна ефективність впровадження.....	134
4.6. Висновки до Розділу 4	135

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ.....	137
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТОК А.....	150
ДОДАТОК Б	152

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасній теорії автоматичного керування одним із ключових напрямків є синтез систем керування в умовах невизначеності. Це пов'язано з різноманітними факторами, такими як неточне задання математичної моделі об'єкта, спрощення в описі моделі, пониження ступеня складності або неврахування існуючих нелінійностей. Невизначеності так само можуть виникати в результаті нелінійностей елементів об'єкта при експлуатації, при впливі на об'єкт зовнішніх збурень, неврахованих факторів. Тому виникає необхідність створення таких автоматичних систем, які при змінних параметрах об'єкта та впливі зовнішніх збурень залишалися би не тільки в стійкому стані, але й забезпечували необхідну якість функціонування. Дослідження й синтез таких систем проводяться в рамках теорії адаптивного та робастного керування. Ідея робастного проектування полягає в тому, що необхідно підібрати такі налаштування керуючих параметрів, щоб вплив неврахованих факторів на вихідні характеристики був мінімальним. В цьому випадку фіксована структура керуючого пристрою з постійними параметрами забезпечує виконання деякої цільової умови при зміні коефіцієнтів математичної моделі чи зовнішніх збурень у деяких відомих межах. Для синтезу систем керування в умовах невизначеності розроблено багато методів. Існують алгебраїчні, частотні методи синтезу робастних систем. Деякі завдання вирішуються як задачі синтезу алгоритмів, які мінімізують квадратичний критерій. У теорії синтезу робастних систем усе більше уваги приділяється якості спроектованих систем. Вводиться таке поняття як інжиніринг якості. Відповідно до цього поняття обирається критерій якості цільового функціонування, що підлягає оптимізації й далі процедура синтезу зводиться до визначення керованих параметрів для експерименту, за результатами якого проводиться аналіз для виявлення керованих змінних, близьких до оптимальних.

До систем автоматичного регулювання теплоенергетичними об'єктами висувають суперечливі вимоги. З одного боку вони повинні мати досить велику швидкодію, а з іншого – бути стійкими і забезпечувати малу коливальність перехідних процесів.

Нараховується декілька сотень методів розрахунку параметрів регулятора і застосування того чи іншого визначається наявними технологічними вимогами до процесу, трудомісткістю методу, знаннями та здібностями розробника та ін. Область ефективної роботи кожного методу занадто обмежена і вимагає виконання умов та обмежень, які часто не відповідають реальним ситуаціям. Застосування не за призначенням того чи іншого методу розрахунку породжує скепсис до більшості з них, особливо до складних, а також тих, які вимагають моделі високого порядку або розмірності (наприклад, метод простору станів).

Утворився розрив між багатьма теоретичними розробками, що часто стали самодостатніми, та реальними потребами практики. Не вистачає методів, які забезпечують розрахунок на потрібний практикам прямі показники якості функціонування.

Відомі успішні результати, що отримані різноманітними підходами, відносяться до області, де процеси в об'єкті управління відповідають простим структурам моделі, а поєднання її параметрів такі, що показники керованості високі, до того ж невизначеності в системі не враховуються.

Необхідно усвідомити важливість цих практичних вимог і знайти метод, який здатний, по-перше, врахувати реальні невизначеності, тобто оцінити область та "найгірший" режим, а по-друге, в цій області знайти найкращу точку по прямому, важливому для практика, показнику якості функціонування або компромісну між деякими показниками.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні якості та надійності роботи водо-парового тракту котлоагрегата шляхом розробки робастної системи керування його тепловими режимами в умовах зміни параметрів устаткування.

Для виконання поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз невизначеностей та їх впливу на динамічні властивості окремих контурів регулювання;
- аналіз існуючих способів керування інерційними об'єктами з запізненням зі змінними параметрами;
- дослідження статичних та динамічних властивостей ділянок водо-парового тракту котлоагрегата як об'єктів керування, ідентифікація та побудова математичних моделей;
- розробка структури регулятора з внутрішньою моделлю на основі H_∞ -норми передавальної функції замкнутої системи;
- визначення залежності основних показників якості функціонування системи від параметрів H_∞ -регулятора;
- дослідження меж робастності системи з отриманим регулятором;
- розробка методики налаштування систем регулювання з H_∞ -ІМС-регулятором для інерційних контурів зі змінними параметрами;
- технічна реалізація АСК на промисловій техніці.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого керування інерційними контурами водо-парового тракту прямоточного парового котла.

Предмет дослідження – системи автоматичного регулювання інерційних ділянок прямоточного котлоагрегата ТЕС, що працює у змінних режимах навантаження.

Методи дослідження. У роботі використовувались теоретичні основи теплоенергетичних процесів та автоматизації, методи ідентифікації, метод оптимального параметричного синтезу, методи дослідження робастної стійкості і якості, а також методи імітаційного комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- уперше розроблена система керування інерційними ділянками водо-парового тракту котла з використанням регулятора з внутрішньою моделлю на базі H_∞ -норми замкненої системи для досягнення робастної стійкості і якості;

- уперше запропоновано використання регуляторів із внутрішньою моделлю з двома ступенями свободи для забезпечення потрібної якості функціонування по каналах завдання та збурення для контурів керування котлоагрегата;
- доведена можливість забезпечення робастної якості системи керування за визначеним показником при зміні параметрів об'єкта у встановлених межах;
- удосконалено метод налаштування регулятора з внутрішньою моделлю, який для робастної системи гарантує виконання поєднання заданих технологічним регламентом значень показників якості в змінних умовах роботи обладнання;
- отримало подальший розвиток застосування регуляторів із внутрішньою моделлю для забезпечення робастної стійкості і якості в системах з об'єктами без самовирівнювання та каскадних системах.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що в результаті застосування *IMC*-регулятора на базі H_∞ -норми замкненої системи отримується робастна система, яка забезпечує задану якість керування в змінних умовах роботи обладнання. На підставі одержаних в дисертації структур H_∞ -*IMC*-регулятора та досліджених залежностей основних показників якості функціонування системи від параметрів його налаштування, створено програму вибору налаштувань H_∞ -*IMC*-регулятора, які для робастної системи гарантовано забезпечують потрібний показник якості або їх комбінацію. Розроблена прикладна бібліотека функціональних блоків, що дозволяє застосовувати регулятори із внутрішньою моделлю в реальних системах керування інерційними об'єктами з запізнюванням для забезпечення робастної якості.

Розроблені структурні рішення, алгоритми керування та їх реалізація на контролерній техніці використані при модернізації АСУТП парового котла Трипільської ТЕС, що підтверджено відповідним протоколом.

Результати роботи також використані у навчальному процесі кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів НТУУ «КПІ» в дисципліні «Автоматизація теплоенергетичних процесів» у вигляді лабораторних робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи обговорювались та доповідались на 9 наукових конференціях: Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика - 2013» (Миколаїв, 2013); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика - 2014» (Київ, 2014); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика - 2015» (Одеса, 2015); I Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизовані системи управління технологічними процесами АЕС і ТЕС» (Мінськ, Білорусь, 2015); IX, X, XI, XII та XIII міжнародній конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (м. Київ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015); наукових семінарах кафедри АТЕП Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Публікації. За результатами роботи опубліковано 14 друкованих праць, у яких викладено основний зміст виконаних досліджень, зокрема 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, одне з яких входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, та 2 статті у виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus) і 8 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатку. Основний зміст роботи викладений на 138 сторінках, враховуючи 50 рисунків та 12 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 101 найменування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів НТУУ «Київський політехнічний інститут» за Державним замовленням на науково-дослідні роботи за темами: «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах

експлуатації» (номер держреєстрації 0112U001751), «Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об'єктів у маневрених режимах» (номер держреєстрації 0114U000564).

У зазначених науково-дослідних роботах автор приймав участь як виконавець.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, автор отримав самостійно. Особистий внесок дисертанта в публікаціях, виконаних у співавторстві наступний: [88, 89] – постановка задачі та дослідження методу розв'язання H_∞ -керування; [90] – розрахунок і дослідження субоптимального H_∞ -регулятора; [91, 92] – постановка та вирішення задач, пов'язаних з автоматичним керуванням об'єктів зі змінними параметрами, зокрема елементами прямоточного котлоагрегату; [93, 95] – застосування структур системи управління з використанням регулятора з внутрішньою моделлю на базі H_∞ -норми для досягнення необхідних показників якості роботи; [96, 97, 100] – синтез системи з регуляторами із внутрішньою моделлю для керування контурами теплоенергетичних об'єктів; [98, 99] – оброблення, аналіз та розрахунок отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМ КЕРУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИМИ КОНТУРАМИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТА

1.1. Опис прямооточного котлоагрегата

1.1.1. Характеристика прямооточного котлоагрегата

Теплоенергетичні об'єкти можна віднести до окремого виду регулювальних об'єктів, які за своїми динамічними характеристиками відрізняються від об'єктів інших галузей промисловості [51, 60, 87]. Для теплоенергетичних об'єктів характерна значна акумулююча здатність, яка виявляється в тому, що при збуренні вихідна величина може деякий час залишатись незмінною або змінюватись так, що перехідний процес має значно більшу тривалість. Такі об'єкти добре фільтрують завади, на них мало впливають короточасні зміни вхідних величин. Окрім того, для більшості теплоенергетичних об'єктів характерна наявність транспортного запізнювання, коли вихідний параметр взагалі виявляє нульову реакцію на вхідне збурення протягом значного проміжку часу. В об'єктах з великим запізнюванням керуючий пристрій після здійснення впливу на об'єкт, тривалий час не може проаналізувати його результати, що призводить до значних відхилень керованих параметрів, а іноді система навіть може втратити стійкість. Наявність таких особливостей кардинально впливає на динамічні властивості системи керування, знижує її стійкість та погіршує якість перехідних процесів.

Щоб повноцінно вивчити властивості об'єкта керування необхідно мати його динамічні характеристики з всіх можливих каналів збурення. Однак найбільш важливими є динамічні характеристики, які зняті при основному збуренні, тобто при збуренні по каналу регульованого впливу, який визначає стійкість та якість перехідних процесів системи автоматичного регулювання. Для отримання точних даних про динамічні властивості об'єкта експерименти

проводять при різноманітних режимах роботи (мінімальне, номінальне та максимальне навантаження енергооб'єкта).

Прямоточний котел з позиції керування є сукупністю складних взаємопов'язаних процесів, з великою кількістю контрольованих та неконтрольованих збурень та підвищеними вимогами до якості регулювання [72].

Котлоагрегат потужністю 300 МВт Таганрозького котельного заводу (ТКЗ) типу ТПП-210А прямоточний, двокорпусний, розрахований для роботи в дубль-блоці з турбіною К-300-240 за схемою з однократним проміжним перегрівом пари.

Кожен корпус є самостійним агрегатом, який має зв'язок із іншим лише каркасом. Котел складається із таких елементів, які знаходяться під тиском: подового екрану 1, нижньої 2 та верхньої 3 радіаційної частин, стелевого пароперегрівника 4, конвективних пароперегрівників 5, водяного економайзера 6, вприскувальних пароохолоджувачів 7, трубопроводів та елементів котельного допоміжного обладнання (Рис. 1.1).

Основним паливом для котлів ТПП-210А Трипільської теплоелектростанції є антрацитовий штиб (АШ), котлоагрегат також розрахований на спалювання природного газу, тому пальники зроблено пилгазовими, а пилосистема обладнана запобіжними вибуховими клапанами. Розпалювальним паливом є мазут, він же ж є аварійним паливом для підсвітки топки при нестійкому горінні АШ.

Основні технологічні параметри котлоагрегату:

- продуктивність: по гострій парі – 475 т/год; по вторинній – 360 т/год;
- тиск: гострої пари – 24,5 МПа; вторинної пари – 3,63 МПа;
- температура: гострої і вторинної пари – 550 °С; живильної води – 274 °С; гарячого повітря – 350 °С; вихідних газів – 156 °С ;

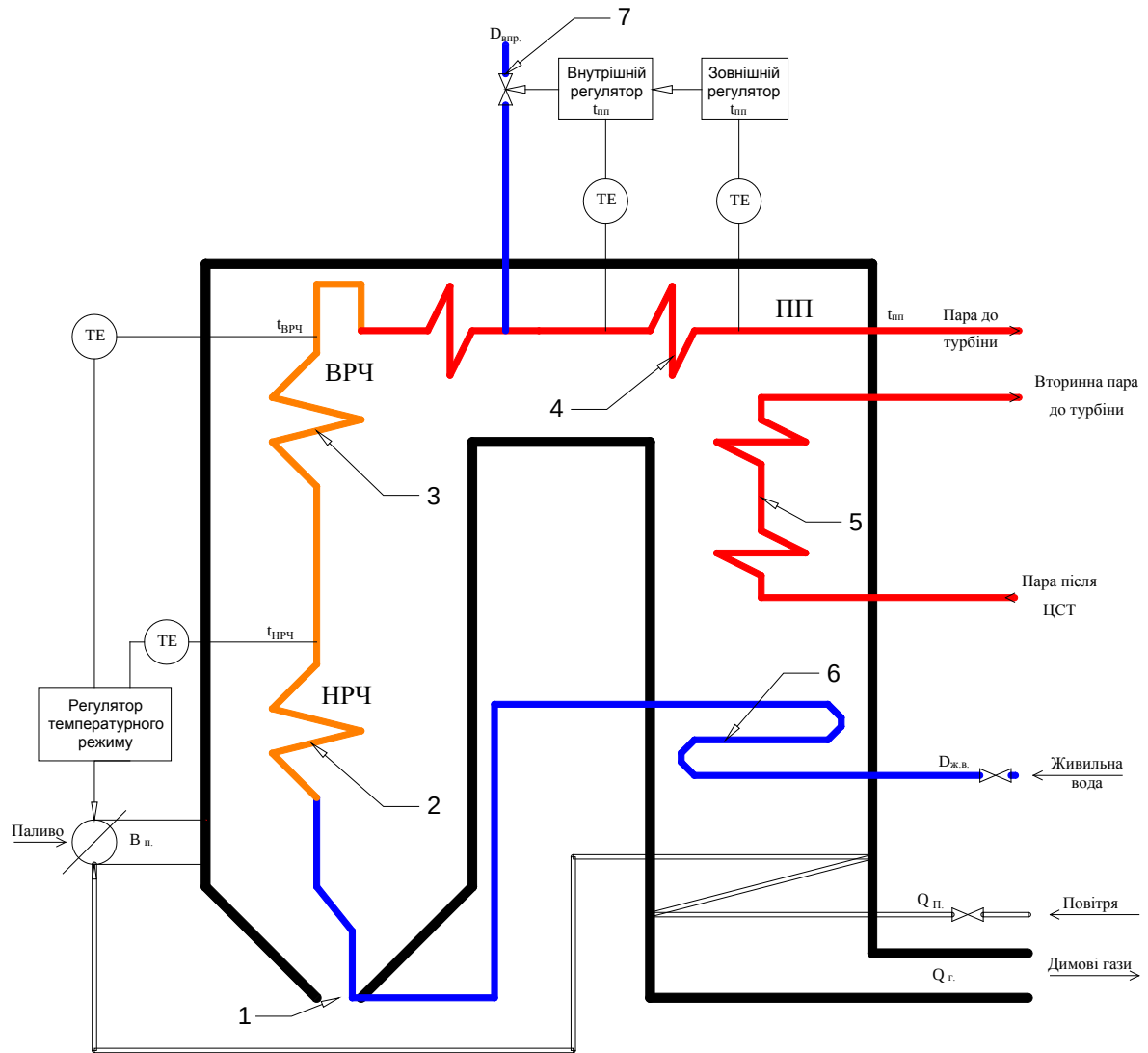


Рис. 1.1. Технологічна схема парового котла ТПП-210А

Спрощена схема зв'язків між вхідними та вихідними величинами прямоточного котла представлена на Рис. 1.2:

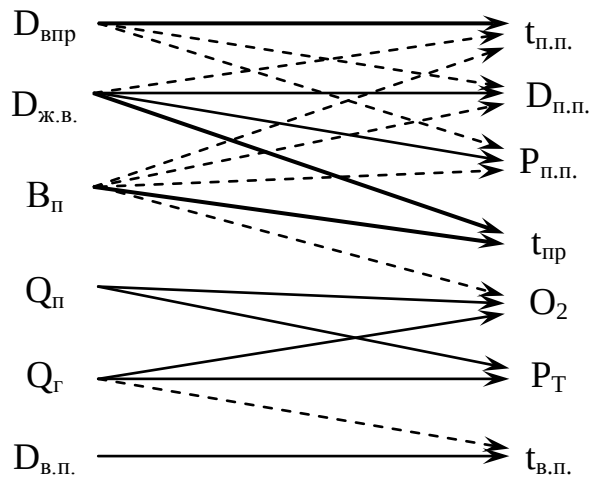


Рис. 1.2. Структурна схема взаємозв'язків параметрів прямоточного котлоагрегата

$D_{впр}$ — витрата води на впорскування; $D_{ж.в.}$ — витрата живильної води; $B_{п}$ — витрата палива; $Q_{п}$ — витрата повітря; $Q_{г}$ — витрата димових газів; $D_{в.п.}$ — витрата вторинної пари; $t_{п.п.}$ — температура первинної пари; $D_{п.п.}$ — витрата первинної пари; $P_{п.п.}$ — тиск первинної пари; $t_{пп}$ — температура в проміжній точці водо-парового тракту; O_2 — вміст кисню у димових газах; P_T — розрідження в топці; $t_{в.п.}$ — температура вторинної пари.

Основними задачами регулювання для прямоточних котлів є задачі регулювання процесу горіння, теплового навантаження, перегріву пари та температурного режиму водо-парового тракту від його початку до першого регульованого впрыску [61, 72].

Спрощено водо-паровий тракт можна представити у вигляді трьох частин: водяної, водо-парової та парової. Вода, послідовно проходячи водяний економайзер, нижній (НРЧ) та верхній (ВРЧ) радіаційні теплообмінники, а потім пароперегрівачі, перетворюється на перегріту пару заданих параметрів. Після проходження циліндра високого тиску турбіни, пара повертається у котлоагрегат для подальшого догріву в пароперегрівачі вторинної пари. Межа між частинами, де випаровується вода та перегрівається пар може змінюватися залежно від витрати живильної води, кількості теплоти, що підводиться та витрати пари.

Основним завданням, що стоїть при експлуатації котельного агрегату, є забезпечення рівності між виробленою і спожитою енергією з урахуванням втрат. В той же час, процеси перетворення і передачі енергії в котлоагрегаті однозначно пов'язані з кількістю речовини в потоках робочого тіла і теплоносія. Таким чином, основна задача регулювання технологічного процесу котлоагрегата зводиться до необхідності підтримки сталого матеріального та енергетичного балансу в ньому. При наявності матеріального та енергетичного балансу котлоагрегат працюватиме в постійному (стаціонарному) режимі, який

характеризується сталістю в часі основних технологічних показників роботи котлоагрегату [73].

При порушенні матеріального чи енергетичного балансу виникають змінні, або перехідні, режими роботи. Такі режими можуть відбутися в результаті різноманітних зовнішніх або внутрішніх збурювальних факторів. В якості зовнішніх збурювальних факторів можуть бути зміна навантаження споживача, зміна тиску чи витрати пари, аперіодичні збурення, що виникають під час аварійних ситуацій та ін. Найбільш істотними внутрішніми збурювальними впливами котлоагрегата є зміна якості або кількості палива, що спалюється, зміна тяго-дутьового режиму, неконтрольовані випадкові збурення, величину і характер яких важко передбачити [59].

Температурний режим первинного тракта, що характеризується температурою пари у проміжних точках НРЧ та ВРЧ, залежить від співвідношення витрати води й палива, а отже змінювати його можна за допомогою будь-якого з цих регулюючих впливів.

При збільшенні теплового навантаження росте споживання пари на турбіні, що призводить до зниження тиску пари в паропроводах. Для відновлення тиску пари регулятор навантаження котла повинен збільшити подачу палива в топку таким чином, щоб його теплосприйняття відповідало кількості пари, що споживається турбінами. Показником відповідності теплосприйняття топки і вироблення пари є тиск пари перед турбіною. Отже, регулятор теплового навантаження котла, що впливає на подачу палива, повинен отримувати контрольні сигнали, які прямо або побічно характеризують тепловиділення в топці. В якості основного сигналу для системи температурного режиму водопарового тракту котла використовується температура в проміжних точках за радіаційними теплообмінниками [59, 72].

Значне підвищення температури пари на виході, а також у проміжних точках котла може призвести до ушкодження найбільш інтенсивних поверхонь нагріву, паропроводу і турбіни. Зниження температури пари від заданого значення становить небезпеку для останніх ступенів турбіни, так як може

призвести до ушкодження лопаток турбіни краплинною вологою. Крім того, це призводить до зниження економічності блоку.

Виходячи з умов надійності металу труб паропроводів і турбіни важливо забезпечити не тільки підтримку температури пари в заданих межах, але й не допустити її різких і частих змін. Коливання температури призводять до різких змін теплових напруг у металі і викликають його втому.

Характерними особливостями водо-парового тракту є значна інерційність, наявність суттєвого запізнення та непостійність параметрів об'єкта керування, які викликані: шумами, неврахованими збуреннями, складністю та багатозв'язністю систем керування, нелінійністю елементів, а також зміною режимів роботи. Останнім часом значно збільшився вплив збурень, пов'язаний зі змінами якості та сортності палива, що використовується для твердопаливних котлоагрегатів. Крім того, суттєву величину зміни параметрів об'єкта вносить зміна навантаження котлоагрегата. Такі зміни відбуваються неперервно протягом доби і мають стохастичний характер.

1.1.2. Вплив зміни навантаження на роботу систем керування котлоагрегата

Умови роботи енергетичної системи та електростанцій, що входять до її складу визначаються режимом електро- та теплоспоживання регіону, який ними обслуговується [84]. Ці умови характеризуються відповідними графіками навантажень – добовими, тижневими, річними. Графіки електричних навантажень показують, що протягом заданого періоду часу (рік, місяць, тиждень, день) енергосистема повинна виробляти змінну кількість енергії.

Річний графік навантажень представляє тривалість використання потужностей електричних станцій протягом року. Графік має характерні 3 ділянки – пікову, перехідну та базову (Рис. 1.3):

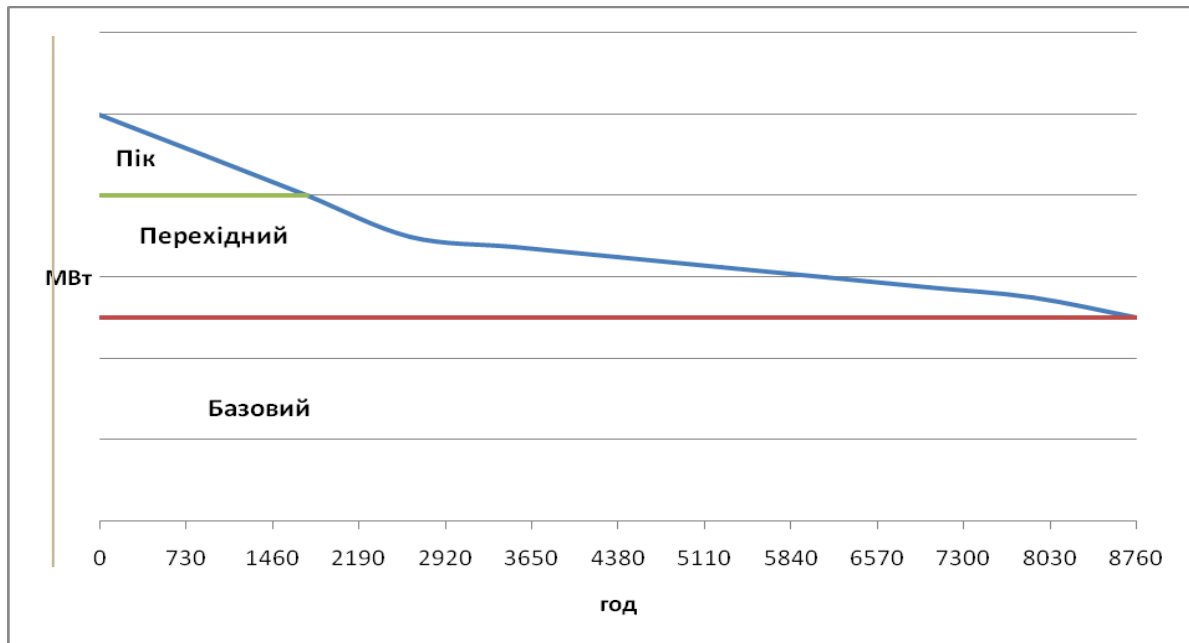


Рис. 1.3. Річний графік електричних навантажень

Цей графік характеризує число годин у році, протягом яких навантаження енергосистеми дорівнює деякій величині. Базову частину річного графіка електричних навантажень забезпечують атомні електричні станції, крупні енергоблоки теплових електричних станцій та гідроелектростанції у період паводку. Перехідну частину графіка забезпечують теплові електричні станції. Пікова частина досягається за рахунок використання гідроелектростанцій та теплових електричних станцій з газотурбінними установками.

Основний графік навантаження – добовий. Електроспоживання протягом доби різко міняється у відносно короткі проміжки часу, що вимірюються годинами і навіть хвилинами, тому покриття цього графіка є найбільш складним завданням.

Добовий графік чітко підрозділяється на постійну і змінну частини: перша відповідає мінімальному навантаженню, друга – являє собою всю площу графіка, розташовану вище мінімального навантаження. Чим менше змінна частина, тим більша щільність графіка.



Рис. 1.4. Типовий вигляд добового графіка електричних навантажень котла ТПП-210А Трипільської ТЕС

При покритті добового графіка електричного навантаження блоком доводиться працювати в широкому діапазоні навантажень від максимального до технічного мінімуму. Тому режими часткових навантажень блоку становлять практичний інтерес як при проектуванні, так і при експлуатації.

На Рис. 1.4 показаний приклад добового графіка електричного навантаження для зимового дня котла ТПП-210А Трипільської ТЕС. З нього видно, що графік має максимуми та мінімуми, і загалом має змінну структуру, що обумовлює зміну режимів роботи електричних станцій протягом дня. Такі коливання навантаження протягом доби є частими в сьогоденній практиці роботи електростанцій. Відповідно до такого графіка доводиться неодноразово змінювати режими роботи парового котла, переводячи його з одного навантаження до іншого. При зміні парового навантаження котла змінюється і навантаження топки, що впливає на динамічні характеристики котлоагрегата [47, 54, 56]. Таким чином, значення параметрів котлоагрегату суттєво залежать від навантаження енергоблоку.

Виконання диспетчерського графіка електричного і теплового навантаження повинно поєднуватися із забезпеченням досить високих техніко-економічних показників, найважливішим з яких є питома витрата палива на одну відпущену кіловат-годину електроенергії.

1.1.3. Вимоги до систем автоматичного регулювання прямоточного котла

Система автоматичного регулювання (САР) повинна забезпечувати матеріальний та енергетичний баланс котлоагрегата [59, 80]: оптимальні співвідношення палива, живильної води та повітря (для досягнення максимального ККД обладнання) та стабілізацію технологічних параметрів (температура, тиск, витрата) на регламентних рівнях, що забезпечує максимальний термін експлуатації обладнання. При цьому САР повинні забезпечити нормальну його роботу не тільки в постійному, але й, особливо, в перехідному режимі роботи, тобто при зміні номінального навантаження в межах від 60-70% до 100% (225-300 МВт).

Складність забезпечення цих вимог визначається взаємопов'язаністю технологічних змінних в об'єкті керування, яким виступає котлоагрегат в цілому. Побудова великої, багатоконтурної та багатозв'язної САР є складною та недоцільною задачею внаслідок того, що така система буде чутливою до найменших збурень та відхилень, а, отже, апріорі нестійкою та неробастною. Тому виконана декомпозиція задачі керування. Внаслідок цього виділено ряд особливо важливих інерційних ділянок об'єкта керування, де яскраво виражене транспортне запізнення та необхідність забезпечення високих показників якості в усьому діапазоні навантажень енергоблоку.

Основними технологічними змінними при розгляді температурного режиму водо-парового тракту котлоагрегата є:

- температура вздовж первинного водо-парового тракту;
- температура первинної перегрітої пари перед подачею її в турбіну.

Для забезпечення надійної роботи котлоагрегата потрібно підтримувати сталість температури перегрітої пари у межах допустимих відхилень $\pm 10^{\circ}\text{C}$

[83]. Зниження температури перегрітої пари нижче допустимих меж може призвести до важких механічних пошкоджень ротора турбіни і лопаток. Збільшення температури пари призводить до погіршення механічних характеристик металічних труб.

Для контуру регулювання температурного режиму водо-парового тракту гранично допустимими показниками [67] є мінімальне динамічне відхилення від заданого рівня температури пари у проміжній точці тракту, ступінь затухання не менший за 75%, час регулювання не повинен перевищувати 1000 с при максимальному навантаженні та 1200 с при мінімальному навантаженні. При цьому необхідно забезпечити близький до аперіодичного перехідний процес.

Вимога високої точності регулювання параметрів для забезпечення надійної та економічної роботи котлоагрегату обумовлює необхідність застосування автоматичних регулюючих пристроїв.

Штатні системи регулювання цими контурами побудовані на базі звичайних ПД-регуляторів і при змінах навантаження часто переводяться у ручний режим, так як задовольнити усі вимоги до якості перехідних процесів одразу на всьому діапазоні навантажень системи не в змозі, адже вони забезпечують або мінімальне динамічне відхилення, або мінімальний час регулювання. Тобто існує технічне протиріччя між деякими показниками якості, вирішення якого потребує застосування нових структур або налаштувань регуляторів.

1.2. Способи керування об'єктами зі змінними параметрами

Робота енергосистем на сьогодні характеризується великим різноманіттям режимів. Воно визначається передусім нерівномірністю графіків навантаження енергосистем, яка зростає і вимагає необхідність частих пусків та зупинок енергоблоків, а також розширення діапазону їх регулювання. Парові котли багатьох енергоблоків працюють на двох видах палива при розподіленому або сумісному спалюванні. В різноманітних режимах може змінюватись склад

працюючого обладнання або виникати обмеження підтримуваних параметрів та регулювальних впливів. Важливими особливостями переходів від одного режиму до іншого є великі значення збурень та різкі зміни статичних і динамічних характеристик ділянок регулювання.

Для забезпечення надійної роботи обладнання енергоблоків необхідно підтримувати основні параметри, а в деяких випадках і швидкості їх зміни в доволі вузьких межах. Тому багаторежимність роботи обладнання визначається необхідністю розширення функцій систем автоматичного керування та жорсткі вимоги до якості їх роботи.

У прямоточному котлі немає фіксованих конструктивних меж між економайзерами, випарними й пароперегрівними поверхнями нагріву. При зміні кількості живильної води, що подається, або тепловиділення в топці, межі між окремими елементами поверхонь нагрівання переміщуються. При підвищенні теплового навантаження й незмінній подачі живильної води довжина економайзерної й випарної частин труб поверхонь нагрівання зменшується, а перегрівної частини – збільшується, що викликає підвищення температури перегріву пари. Таким чином, у прямоточному котлі невелике відхилення в перехідний період теплового навантаження або витрат води призводять до значної зміни температури перегріву пари [72].

Настільки сильний вплив експлуатаційних факторів призводить до значних відмінностей динамічних параметрів котельних агрегатів, які знаходяться в експлуатації. При цьому налаштування регуляторів, виконане перед пуском котлоагрегата в експлуатацію, через деякий час може не забезпечити задовільної динамічної якості системи. Це означає, що задача керування агрегатом із заданою якістю при різних навантаженнях стає дуже актуальною.

Існує декілька способів керування об'єктом, параметри якого постійно змінюються, серед яких відзначимо такі:

- табличне керування – дискретне налаштування за ознаками, що характеризують зміну статичних або динамічних властивостей об'єкта керування;

- адаптивне керування – зміна структури системи керування або її параметрів при зміні режимів роботи обладнання, його складу, а також при виникненні обмежень;

- робастне керування – побудова схем керування, які малочутливі до зміни властивостей об'єкта керування.

Найпростішим методом адаптації регулятора до змінних властивостей об'єкта є табличне керування коефіцієнтами регулятора. Він може бути використаний не лише для адаптивного керування, але і для керування нелінійними об'єктами, нестационарними процесами, при необхідності зміни параметрів залежно від умов.

Принцип табличного керування дуже простий. Маючи апріорні дані про можливі зміни режиму роботи системи, виконують ідентифікацію об'єкта для кількох різних режимів і для кожного із них знаходять параметри регулятора. Значення цих параметрів записують у таблицю. У процесі функціонування системи вимірюють величину, яка характеризує режим роботи системи, і залежно від її значення вибирають із таблиці значення коефіцієнтів регулятора.

Контур, який використовується для адаптації, є розімкнутим. Саме з цієї причини табличне керування характеризується високою швидкістю, відсутністю помилкового спрацювання або розбіжністю алгоритмів адаптації.

Недоліками такого методу є: а) великі витрати на попередню ідентифікацію, необхідну на складання таблиці; б) потреба вирішення проблеми безударного переходу з одного режиму на інший; в) погіршена якість керування при підході до границі режиму; г) неможливість переходу на інший режим налаштувань регулятора при збуреннях і змінах, які не враховані при формуванні таблиці налаштувань. Таким чином, табличне керування коефіцієнтами регулятора варто використовувати тоді, коли заздалегідь відомі види та величини збурювальних факторів, які до того ж можна виміряти.

При адаптивному керуванні використовують три принципово важливих етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора та налаштування регулятора. Часто останній етап включає етап підлаштування (заклучна

оптимізація налаштування). Оптимізація налаштування необхідна через те, що методи розрахунку параметрів регулятора за формулами не враховують нелінійності об'єкта, а ідентифікація параметрів об'єкта виконується із деякою похибкою.

Необхідно зауважити, що незважаючи на наявність автоматичного підлаштування, контролер не може забезпечити необхідної якості регулювання по причинах, які не залежать від якості закладених в нього алгоритмів [51]. Наприклад, об'єкт керування може мати залежні контури регулювання, велике запізнення, високий порядок об'єкта; об'єкт може бути нелінійним; датчики можуть бути розташовані не в тому місці, де потрібно, і матимуть поганий контакт із об'єктом; рівень завад у вимірювальному каналі може бути недопустимо великим; роздільна здатність датчика може бути недостатньо високою; джерело вхідного впливу на об'єкт може мати велику інерційність або гістерезис; можуть бути також помилки в монтажі системи, погане заземлення, обриви провідників і т.д. Тому, перед тим як починати автоматичне налаштування, необхідно впевнитися у відсутності названих проблем. Наприклад, якщо внаслідок зносу механічної системи з'явився непередбачений проектом гістерезис і тому система знаходиться в коливальному режимі, підлаштування регулятора може не дати бажаного результату, поки не усунена причина проблеми [58].

Використання в САР алгоритмів адаптації, які забезпечують в процесі роботи об'єкта налаштування алгоритмів регулювання, хоч і дозволяють вирішити певний ряд задач, проте мають деякі недоліки. По-перше, під час перехідних процесів в контурі самоналаштування якість основних контурів САР знижується, що само по собі може спровокувати виникнення аварійної ситуації. А це недопустимо на важливих контурах котлоагрегата. По-друге, розробка ефективних алгоритмів самоналаштування є зовсім не тривіальною задачею.

Робастне керування означає отримання перехідних процесів заданої якості у системі при єдиному наборі налаштувань регулятора при різних режимах роботи обладнання [49].

Для отримання робастних налаштувань регулятора варто знати лише параметри об'єкта у номінальному режимі роботи та можливі зміни параметрів відносно номінальних значень при зміні режиму роботи. Маючи цю інформацію, регулятор налаштовується лише один раз, і в подальшому використовують саме ці коефіцієнти регулятора. При цьому, такі налаштування забезпечують задану якість перехідних процесів у змінних режимах роботи об'єкта.

Регулятор, який базується на робастному підході, повністю ефективний з самого початку керування, в той час як адаптивні регулятори спочатку повинні налаштуватись на систему.

Таким чином, потреби технології з подальшим підвищенням ефективності управління технологічного виробництва визначають необхідність розробки автоматичних систем, алгоритми яких реалізують, поряд з іншими, функцію гарантованого, з наперед заданою ймовірністю, дотримання встановлених регламентом гранично-допустимих значень змінних.

Застосування робастного підходу дозволяє істотно спростити апаратне і програмне забезпечення, що застосовується в АСК у порівнянні з адаптивними системами. Можливість апіорного вибору структури і параметрів регуляторів знижує витрати на налагодження й обслуговування АСК. Однак, строгі математичні методи робастного синтезу малопридатні для вирішення конкретних інженерних завдань. Це обумовлено великою складністю застосовуваних обчислювальних процедур, високим порядком одержуваних регуляторів та малопридатністю цих методів для об'єктів з запізненням, які дуже часто зустрічаються в теплоенергетиці. У такій ситуації дуже перспективною є розробка простих методів синтезу робастних систем.

1.3. Огляд основних положень робастної теорії

Використання грубості систем по відношенню до різного виду неврахованих факторів, пов'язаних з неточним описом як самого об'єкта, так і зовнішнього впливу на нього, мають велику історію. Вважається, що концепція грубості систем вперше була представлена в 1937 р. в роботі Андронова А.А. та Понтрягіна Л.С. [46]. Системи, в яких топологічна структура не змінювалась, були названі *грубими*. Подальший опис грубості систем при малих змінах параметрів було пов'язано з вводом коефіцієнта чутливості.

В той же час основна увага надавалось нелокальній робастності, коли зміни параметрів відбувались в кінцевому, але великому діапазоні. Разом з появою концепції управління зі зворотнім зв'язком виникла задача синтезу грубих систем автоматичного керування.

В 1981 р., після публікації в [43] результатів розв'язання задачі стабілізації при збуреннях з невідомим спектром, постановка та вирішення задачі були розширені на випадок збурень в описі об'єкта. Останнім часом законодавцями в теорії грубого управління виступають закордонні наукові школи. Саме тому, у вигляді прямого запозичення з англomовної літератури, термін "грубість" виявився витісненим терміном "робастність" (від англ. *robustness* – грубий, міцний).

Система автоматичного регулювання повинна бути не тільки стійкою, але і задовольняти ряду вимог з конкретних умов роботи об'єкта регулювання. В кожному конкретному випадку ці вимоги можуть бути різні. Таким чином, стійкість є необхідною, проте далеко недостатньою умовою задовільної роботи АСК.

Будь-який синтез системи управління заснований на деякій поведінці моделі об'єкта. І в результаті, регулятор обов'язково буде залежати від інформації, закладеної в цю модель. Оскільки модель являє собою лише абстрактне наближення вибраних особливостей реальних систем, то вона ніколи не буває повною і завжди певною мірою невизначена. Її невизначеність

впливає на якість досягнутих результатів синтезу, яка зазвичай залежить від наступних факторів:

- вимірювання шуму в ідентифікації і контролю;
- невраховані під час ідентифікації та контролю збурення на об'єкт;
- чисельні помилки і інші недосконалості методів, використовуваних в ідентифікації, проектуванні та управлінні;
- нелінійності об'єкту, що мають відношення до великих відхилень від фіксованих робочих точок або околиці робочої точки (наприклад, гістерезис);
- не модельована (висока частота) динаміка об'єкту, тобто динаміка, яка не розглядається в отриманні регулятором рівнянь або структури;
- часові зміни динаміки об'єкта.

Всі методи синтезу намагаються на практиці якось впоратись з впливом усіх цих факторів. В останні десятиліття робастні аспекти, пов'язані з невизначеністю моделі розглядаються більш ретельно. З'явилося багато робіт про робастне управління на основі H_2 - і H_∞ -норми [29, 65, 68], виявили та проаналізували багато корисних функцій і методів [26, 28, 34]. Тим не менш, величезна кількість нових робіт, присвячених робастному управлінню простих систем (SISO), які намагаються оптимізувати традиційні рішення або запропонувати нові, показують, що як і раніше існують особливості ПІД-регулювання, які потребують покращення [2, 5, 25, 57, 73, 76].

Головна перевага використання моделей з невизначеностями – більш якісний і коректний опис реального процесу. Така модель дозволяє обґрунтованіше вести розробку АСК, зокрема – оцінити потенційні можливості їх альтернативних варіантів. Зрештою, це забезпечує робастність розробленої АСК, яка здатна реалізувати свою цільову функцію в широкому діапазоні змін властивостей об'єкта управління, які викликаються певними порушеннями умов його нормальної експлуатації.

Структура системи, що включає потенційні невизначеності, зображена на Рис. 1.5. Дана модель враховує шум датчика, непередбачуване збурення і об'єкт управління з неврахованою динамікою або параметрами, схильними до зміни. Всі ці фактори можуть бути дуже значними, тому проблема полягає в тому, щоб система, синтез якої проводиться, зберігала бажану якість.

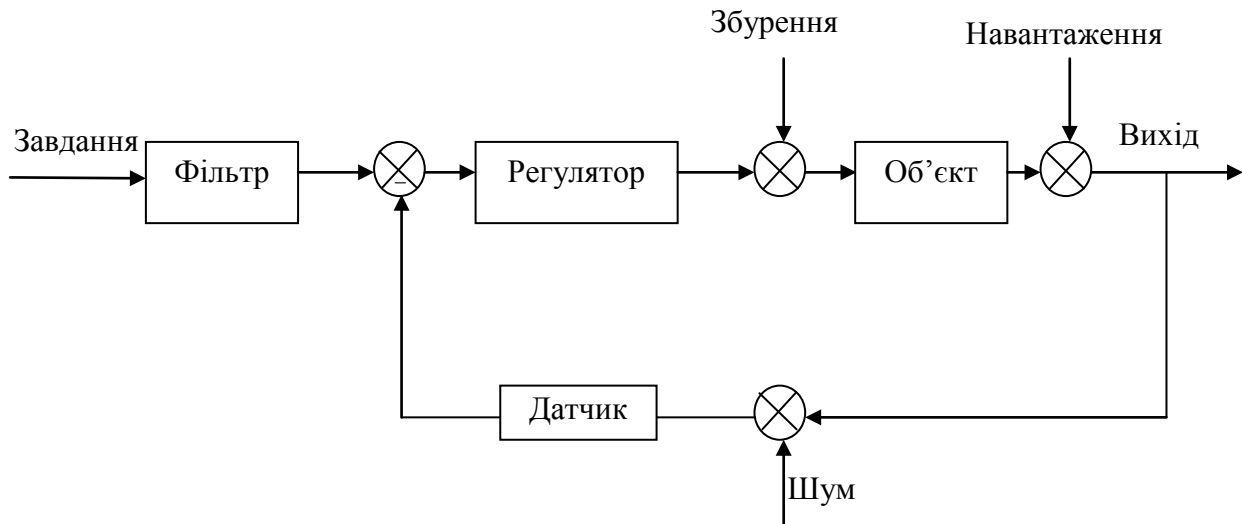


Рис. 1.5. Структурна схема замкнутої структури керування

Від робастної системи потрібно, щоб вона, по-перше, володіла низькою чутливістю, по-друге, зберігала стійкість і по-третє, задовольняла вимогам, що пред'являються до її якості, у досить великому діапазоні зміни її параметрів. Робастність, по суті характеризується чутливістю системи до чинників, які не враховувалися на етапах аналізу і синтезу – наприклад, до збурень, шуму датчика і не відображених у моделі системи параметрів, що впливає на її динаміку. Система повинна бути здатна протидіяти впливу цих факторів при виконанні завдань, заради яких вона проектувалася.

Синтез систем високої точності в умовах невизначеності є класичною проблемою теорії управління. Основи вирішення цієї проблеми були закладені на початку 1930-х років у зв'язку з аналізом чутливості систем зі зворотним зв'язком. З тих пір було опубліковано велику кількість робіт [15, 19, 21, 55, 66, 76], які розглядають дану проблему. Від проектувальника потрібно, щоб створювана ним система функціонувала належним чином у широкому діапазоні

зміни невизначених параметрів. Кажуть, що система є робастною, якщо вона володіє достатньою надійністю, стійкістю і гнучкістю.

Метою синтезу робастної системи є гарантія необхідної якості незалежно від похибок і зміни параметрів моделі. Робастна система керування володіє необхідною якістю незважаючи на істотну невизначеність характеристик об'єкта управління.

1.3.1. Типи невизначеностей при розгляді робастних систем

Коли мова йде про робастні системи, то мається на увазі робастність зі стійкості. Тобто кажуть, що система робастна в заданому класі збурень, якщо при будь-яких збуреннях з цього класу вона залишається стійкою [48]. Окрім цього, розрізняють робастність по показникам якості системи. Вважається, що система робастна по заданому показнику якості на вказаному класі невизначеностей, якщо при будь-яких збуреннях з цього класу вона залишається стійкою й погіршення значення показника знаходиться в допустимих межах.

Розглядаючи прямоточний котел в класі теплоенергетичних об'єктів, слід відмітити, що адекватний математичний опис таких об'єктів управління аналітичними методами з усім різномаяттям характеристик сировинних та енергетичних потоків, станів робочих органів та активних зон агрегатів є вельми складною та тривалою процедурою. Альтернативою такому підходу в отриманні адекватних моделей є апріорне визнання і відображення в моделях їх неповноти (невизначеності). Враховуючи наявну практику використання моделей при розробці САК для теплоенергетичних об'єктів, невизначеності моделей можна (умовними чином) поділити на три складові: структурну, параметричну та координатну [85].

Структурна невизначеність відображає принципову неможливість задання розмірності моделі об'єкта керування, що точно відповідатиме властивостям об'єкта-оригінала, тобто порядку її диференціальних рівнянь або розмірності простору станів. Параметрична невизначеність – неможливість точного задання

значень коефіцієнтів диференційних рівнянь. Координатна невизначеність – неможливість отримання точних значень змінних та статистичних оцінок, які вимірюються та обчислюються на їх основі. Структурну невизначеність можна задати введенням у структуру моделі ланок чистого запізнювання; параметричну – у вигляді моделей неконтрольованих параметричних збурень; координатну – у формі моделі шумів вимірювання, адитивних координат, що вимірюються.

Як правило, важко отримати точне математичне рівняння, що описує невизначеність. Зважаючи на це, досить часто достатньо визначити верхню межу або довірчий інтервал для моделювання помилки, яка може бути легко використана для подальших досліджень.

Невизначеність моделі або невідповідність моделі об'єкту є поширеним явищем в теплоенергетиці. Це відноситься до випадку, коли ідентифікатори моделі не відповідають реальному процесу. Невизначеність може відбутися в двох формах: перша, коли існує неструктурна невідповідність, тобто структура моделі є правильною, але параметри не збігаються; і друга, коли структура моделі, або порядок моделі не збігаються один з одним (наприклад, структурні невідповідності).

Дві важливі змінні можуть бути використані для кількісного опису невизначеності: мультиплікативної та адитивної помилки моделі. Позначимо за невизначеність $\Delta(s)$, а $P(s)$ та $P_n(s)$ представляють реальний та номінальний об'єкт. Тоді співвідношення між реальним процесом і моделлю визначатиме:

Адитивна невизначеність: $P(s) = P_n(s) + \Delta_a(s)$, звідки $\Delta_a(s) = P(s) - P_n(s)$

Мультиплікативна невизначеність: $P(s) = 1 + P_n(s)\Delta_m(s)$, де $\Delta_m(s) = \frac{P(s) - P_n(s)}{P_n(s)}$

Тут $\Delta_m(s)$ є фіксованою стійкою передавальною функцією. $\Delta(s)$ є змінною стійкою передавальною функцією, яка задовольняє $\|\Delta(s)\|_\infty \leq 1$. Це можна розглядати як нормовану невизначеність.

Неструктуровану невизначеність можна охарактеризувати [9] як коло на комплексній площині: на кожній частоті ω , точка $W_o'(j\omega)$ лежить в колі з

центром $W_o(j\omega)$ і радіусом $|\Delta_m(j\omega)|$, як показано на Рис. 1.6. Таким чином, $W_o'(s)$ описує сімейство моделей, а не одну модель.

Неструктуровані невизначеності важливі з двох причин:

1) Всі моделі, що використовуються в структурі регулятора повинні включати неструктуровані невизначеності для покриття немодельованої динаміки (наприклад, нелінійності).

2) З неструктурованої невизначеності, можуть бути отримані прості і загальні результати не тільки для робастної стійкості, а й для робастної якості.

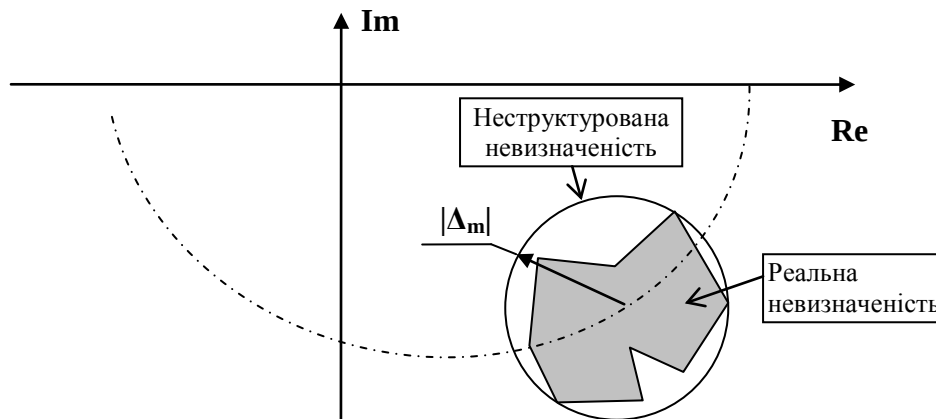


Рис. 1.6. Коло для опису неструктурованої невизначеності

Як приклад, регіон неправильної форми на Рис. 1.6 представляє параметр невизначеності. Невизначеність, як правило, описується колом, яке легко представити математично.

Припустимо, що номінальна замкнута система є внутрішньо стійкою. За критерієм Найквіста, відомо, що для кожної частоти ω крива Найквіста $L(j\omega) = W_o(j\omega)W_p(j\omega)$ не охоплює точку $(-1, 0)$, а кількість його обертів дорівнює сумі числа полюсів $W_o(s)$ в правій напівплощині (ПНП) і числа полюсів $W_p(s)$ в ПНП. Відомо також, що $W_o(s)$ і $W_o'(s)$ мають однакове число полюсів ПНП. Таким чином, $W_p(s)$ забезпечує робастну стійкість, тільки якщо крива Найквіста $L'(j\omega) = W_o'(j\omega)W_p(j\omega)$ не охоплює точку $(-1, 0)$ для кожної частоти ω .

Розглянемо просту геометричну інтерпретацію, представлену на Рис. 1.7. При частоті ω , $L'(j\omega)$ представляє собою коло в комплексній площині. Коло має центр $L(j\omega)$ і радіус $|\Delta_m(j\omega)W_o(j\omega)W_p(j\omega)|$. Радіус позначає максимально збурену

сферу $L(j\omega)$. Відстань від $L(j\omega)$ до точки $(-1, 0)$ становить $|1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)|$. Ясно, що $L(j\omega)$ не включає в себе точки $(-1, 0)$ для кожної частоти ω тоді і тільки тоді, якщо

$$|1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)| > |\Delta_m(j\omega) W_o(j\omega) W_p(j\omega)|. \quad (1.1)$$

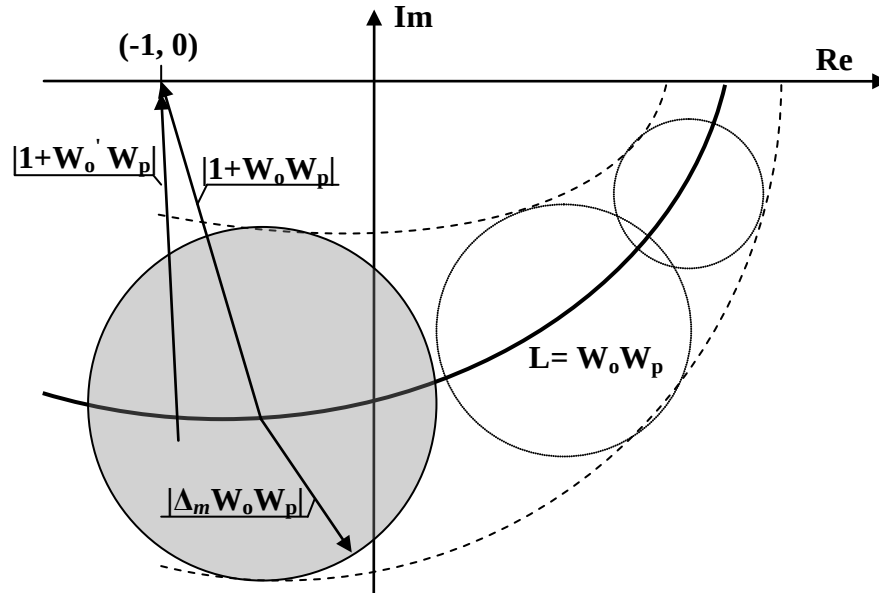


Рис. 1.7. Графічна інтерпретація робастної стійкості

Так як

$$T(j\omega) = W_o(j\omega) W_p(j\omega) / (1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)), \quad (1.2)$$

то підставивши у (1.1), маємо $|\Delta_m(j\omega)T(j\omega)| < 1, \forall \omega$.

Таким чином, регулятор $W_p(s)$ забезпечує робастну стійкість тільки якщо $\|\Delta_m(s)T(s)\|_\infty < 1$.

Тепер розглянемо робастну якість. Припустимо, що номінальна замкнута система є внутрішньо стійкою.

Згідно Рис. 1.7, відстань від точки $(-1, 0)$ до точки на колі становить $|1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)|$, а найменша відстань від точки $(-1, 0)$ до точки на колі – $|1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)| - |\Delta_m(j\omega) W_o(j\omega) W_p(j\omega)|$ для кожної частоти ω .

Тоді $|1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)| \geq |1 + W_o(j\omega) W_p(j\omega)| - |\Delta_m(j\omega) W_o(j\omega) W_p(j\omega)|$.

Після нескладних перетворень можна отримати

$$|\tilde{S}(j\omega)| \leq \frac{|S(j\omega)|}{1 - |\Delta_m(j\omega)T(j\omega)|}$$

де $S(s)$ визначається згідно

$$S(j\omega) = \frac{1}{1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)}$$

Отже, робастна якість вимагає, щоб $\|W_v(s)\tilde{S}(s)\|_\infty < 1$.

Таким чином, необхідною і достатньою умовою для робастної якості є

$$|W_v(j\omega)S(j\omega)| + |\Delta_m(j\omega)T(j\omega)| < 1, \quad \forall \omega \quad (1.3)$$

Умови робастної якості також мають хорошу графічну інтерпретацію. Коли обидві сторони умови (1.3) будуть домножені на $|1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)|$, то будуються два кола для кожної частоти ω : одне з центром $(-1, 0)$ і радіусом $|W_v(j\omega)|$, а інше з центром $W_o(j\omega)W_p(j\omega)$ і радіусом $|\Delta_m(j\omega)W_o(j\omega)W_p(j\omega)|$. Умова виконується, тільки якщо ці два кола не перетинаються (Рис. 1.8).

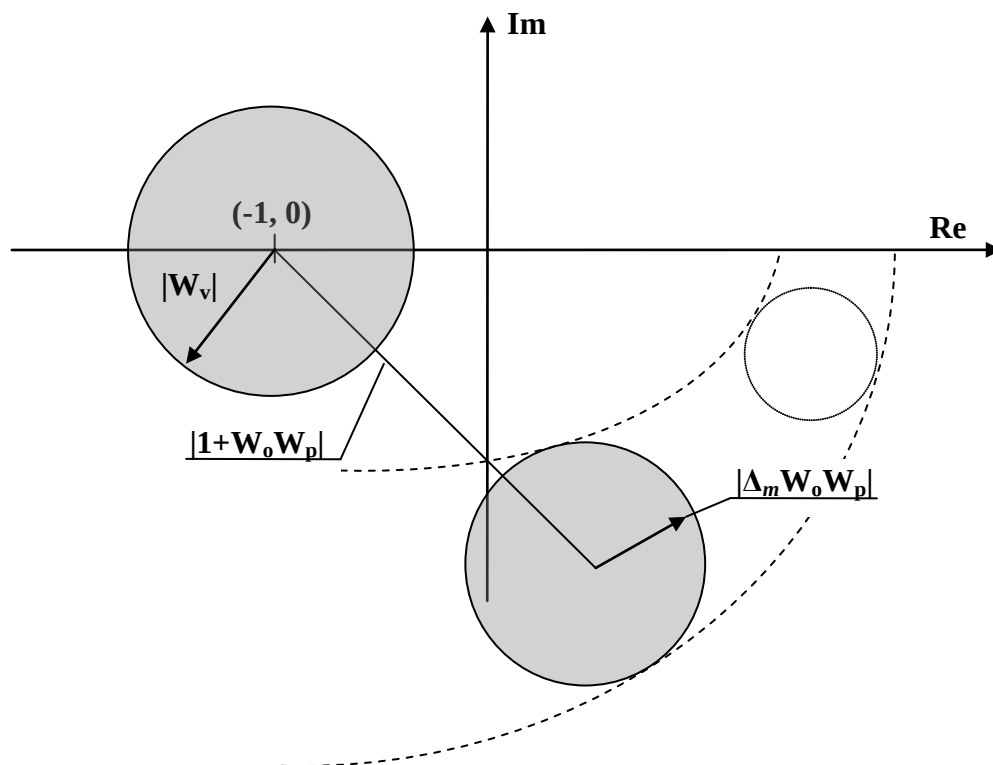


Рис. 1.8. Графічна інтерпретація робастної якості

Робастна якість передбачає як робастну стійкість так і номінальну якість. Бажано, щоб $\|W_v(s)S(s)\|_\infty$ було малим для гарної номінальної якості і в той же час зробити $\|\Delta_m(s)T(s)\|_\infty$ малим для гарної робастної стійкості. На жаль, взаємозалежність $S(s) + T(s) = 1$ ставить обмеження задачі. Поліпшення номінальної якості погіршує робастну стійкість і штовхає систему до нестабільності. З іншого боку, хороша робастна стійкість може бути отримана шляхом принесення в жертву номінальної якості.

1.3.2. Робастність систем з запізненням

Розглянемо модель першого порядку з запізненням:

$$W_o(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-s\tau} \quad (1.4)$$

де K – коефіцієнт підсилення, T – постійна часу, τ – час запізнення, і при цьому $K \in [K_{\min}, K_{\max}]$, $T \in [T_{\min}, T_{\max}]$, $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.

Сімейство невизначеностей моделі для цього об'єкту показана на Рис. 1.9.

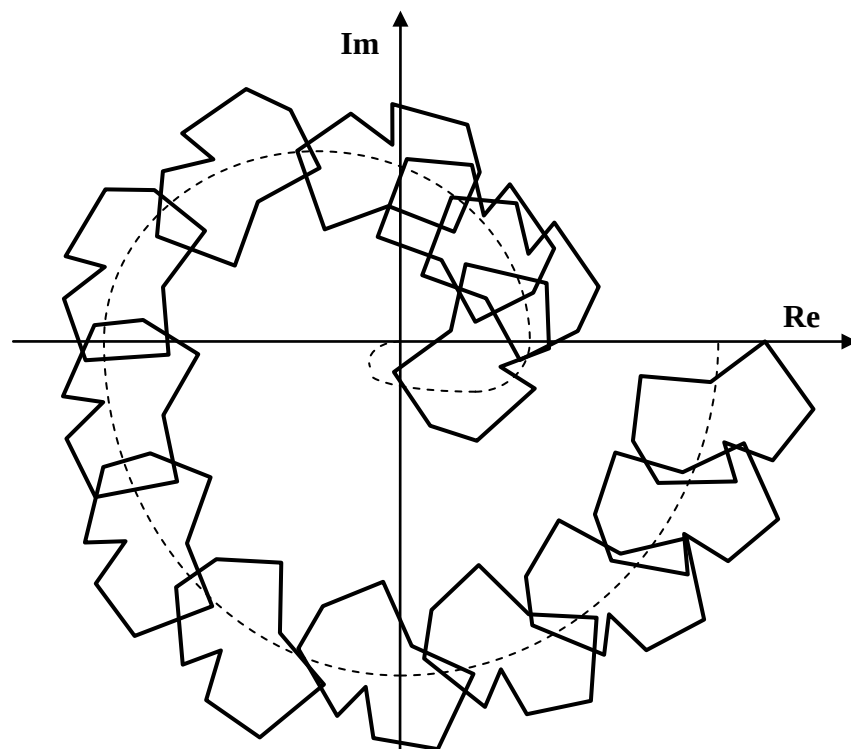


Рис. 1.9. Сімейство невизначеностей моделі для об'єкту першого порядку з запізненням

Методи проектування можна умовно розділити на два види:

1) Синтез, пов'язаний з робастністю, накладену на штатну систему. Регулятор розраховується для номінального об'єкта, а потім використовувати для реального об'єкта.

2) Синтез для невизначеної системи. Регулятор розроблюється на основі номінального об'єкта і пов'язаних з ним невизначеностей, а потім використовується для реального об'єкта.

В обох цих методах, потрібен номінальний об'єкт. В якості номінального об'єкту оберемо "центр" невизначеною об'єкту:

$$W_o(s) = \frac{K''}{T''s + 1} \exp(-s\tau'') \quad (1.5)$$

$$\text{де } K'' = \frac{K_{\min} + K_{\max}}{2} \quad T'' = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \quad \tau'' = \frac{\tau_{\min} + \tau_{\max}}{2}$$

Параметр невизначеності:

$$|\delta K| \leq \Delta K = |K_{\max} - K''| < |K''| \quad |\delta T| \leq \Delta T = |T_{\max} - T''| < |T''| \quad |\delta \tau| \leq \Delta \tau = |\tau_{\max} - \tau''| < |\tau''|$$

Тоді сімейство моделей з невизначеностями можна записати у вигляді:

$$W_o(s) = \frac{(K + \delta K)}{(T + \delta T)s + 1} \exp[-s(\tau + \delta \tau)] \quad (1.6)$$

При збільшенні коефіцієнта передачі, час регулювання зменшується і збільшується динамічний викид. І навпаки, зі зменшенням коефіцієнта підсилення, час регулювання збільшується і викид зменшується або зникає.

З підвищенням постійної часу збільшується час регулювання, а динамічні процеси стають стійкішими. Якщо постійна часу зменшується – зменшується час регулювання, але вихід системи починає коливатися. Коли час запізнення збільшується – збільшується динамічний викид.

Можна зауважити, що коефіцієнт підсилення і час запізнення мають більший вплив на вихід замкнутої системи, ніж постійна часу. Коли стала часу зменшується, а коефіцієнт підсилення і часу запізнення збільшується, зміни виходу замкненої системи є найбільшим.

Перепишемо невизначеність моделі у вигляді

$$W_o(s) = \frac{K \exp(-s\tau)}{Ts + 1} [1 + \delta_m(s)] \quad (1.7)$$

де

$$\delta_m(s) = \frac{K + \delta K}{K} \frac{Ts + 1}{(T + \delta T)s + 1} e^{-s\delta\tau} - 1 \quad (1.8)$$

Нехай $|\Delta_m(j\omega)|$ буде межа $|\Delta_m(j\omega)|$, а сама $|\Delta_m(j\omega)| \leq |\Delta_m(j\omega)|$. $|\Delta_m(j\omega)|$ дорівнює радіусу найменшого кола, що містить кордон параметрів невизначеності.

Коли є одночасна невизначеність на коефіцієнт підсилення, постійну часу та час запізнення, виходять такі аналітичні вирази для профілю невизначеності:

$$|\Delta_m(j\omega)| = \begin{cases} \left| \frac{|K| + \Delta K}{|K|} \frac{jT\omega + 1}{j(T - \Delta T)\omega + 1} e^{j\Delta\tau\omega} - 1 \right|, & \omega < \omega^* \\ \left| \frac{|K| + \Delta K}{|K|} \frac{jT\omega + 1}{j(T - \Delta T)\omega + 1} \right| + 1, & \omega \geq \omega^* \end{cases} \quad (1.9)$$

де ω^* визначається

$$\Delta\tau\omega^* + \arctan \frac{\Delta T\omega^*}{1 + T(T - \Delta T)\omega^{*2}} = \pi, \quad \frac{\pi}{2} \leq \Delta\tau\omega^* \leq \pi \quad (1.10)$$

Зокрема, коли тільки коефіцієнт підсилення є невизначеним, тобто $\Delta T = \Delta\tau = 0$, вираз спрощується:

$$|\Delta_m(j\omega)| = \Delta K / |K|.$$

Коли тільки постійна часу є невизначеною, тобто $\Delta K = \Delta\tau = 0$ вираз спрощується до

$$|\Delta_m(j\omega)| = \left| \frac{jT\omega + 1}{j(T - \Delta T)\omega + 1} - 1 \right|$$

Коли тільки час запізнення є невизначеним, $\Delta T = \Delta K = 0$ і $\omega = \pi / \Delta\tau$. В цьому випадку,

$$|\Delta_m(j\omega)| = \begin{cases} |\exp(j\Delta\tau\omega) - 1|, & \omega < \pi / \Delta\tau \\ 2, & \omega \geq \pi / \Delta\tau \end{cases}$$

Для всіх δK , δT і $\delta \tau$, $|\Delta_m(j\omega)|$ має верхню межу, яка робить $|\delta_m(j\omega)| \leq |\Delta_m(j\omega)|$. Таким чином, максимальна відстань від точки $(-1, j0)$ до $\delta_m(s) + 1$ визначається як $|\Delta_m(j\omega)|$.

При $|\delta K| \leq \Delta K$, $|\delta T| \leq \Delta T$, $|\delta \tau| \leq \Delta \tau$, з частотою $s = j\omega$, всі можливі точки $\delta_m(s) + 1$ знаходяться в певному регіоні. На основі геометричних побудов, можна довести, що точка $\delta K = \Delta K$, $\delta \tau = \Delta T$ і $\delta T = \Delta \tau$ є однією з найдалших від $(-1, j0)$ для всіх $\omega < \omega^*$, де ω^* – частота, при якій кут цієї точки дорівнює π . Крім того, результат для $\omega \geq \omega^*$ можна отримати, використовуючи нерівність трикутника.

На практиці перевірка робастної якості систем з запізненням за допомогою необхідної і достатньої умови є незручною. І слід розглядати питання про внутрішню стійкість і якість, які будуть справедливими для гіршого випадку.

1.3.3. Керування інерційними об'єктами з запізненням за допомогою предикторів

Для керування інерційними об'єктами з великим транспортним запізненням (зазвичай при відношенні запізнення до постійної часу об'єкта більшим за 0,5) використовують спеціальні структури ПД-регуляторів, що мають в своєму складі блоки для передбачення поведінки об'єкта через час запізнення – предиктори (від англ. *prediction* – прогнозування). Структура такого регулятора, була запропонована Смітом у 1957 році і відтоді називається предиктором Сміта. Предиктор Сміта включений до деяких промислових ПД-регуляторів.

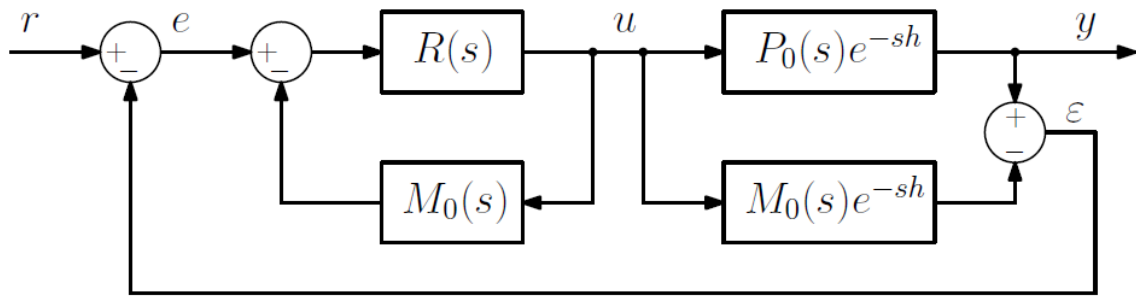


Рис. 1.10. Система управління з предиктором Сміта

На Рис. 1.10 показана структурна схема такого регулятора під назвою предиктор Сміта [3, 8, 52]. Він включений в деякі промислові ПІД-регулятори. Метою цього регулятора є передбачити, який сигнал ми отримаємо на виході об'єкта до того, як він там з'явиться насправді. Для передбачення можна використовувати модель об'єкта управління, що складається з дробово-раціональної частини M_0 та транспортної затримки e^{-sh} . Завдяки тому, що з моделі можна виключити запізнення, з'являється принципова можливість передбачення поведінки об'єкта до появи сигналу на його виході. Тут R – звичайний ПІД-регулятор, $P_0 e^{-sh}$ – передавальна характеристика об'єкта управління.

Принцип роботи даного регулятора полягає в наступному. Припустимо, що модель абсолютно вірна і її параметри точно відповідають параметрам об'єкта. Тоді різниця сигналів на виходах моделі та об'єкта дорівнюватиме нулю ($\varepsilon = 0$). Але в такому випадку безпосередньо зі схеми на Рис. 1.10 можна отримати:

$$y = P_0 e^{-sh} \left(\frac{R}{1 + R M_0} \right) r = \left(\frac{P_0 R}{1 + P_0 R} e^{-sh} \right) r$$

У цьому виразі член $P_0 R / (1 + P_0 R)$ являє собою передавальну функцію системи без транспортної затримки. А це означає, що ланка з запізненням не входить у контур зворотного зв'язку і не впливає на стійкість і швидкодію системи, тобто відбувається регулювання в контурі з моделлю без запізнення, яке додається тільки до отриманого результату.

Розглянемо тепер роботу предиктора Сміта без припущення $\varepsilon = 0$. У цьому випадку схему на Рис. 1.10 можна описати наступними рівняннями:

$$y = P_0 e^{-sh} R(r - \varepsilon - M_0 u), \quad \varepsilon = y - M_0 e^{-sh} u, \quad y = P_0 e^{-sh} u$$

звідки можна знайти

$$y = \left(\frac{P_0 R}{1 + R M_0 + R(P_0 - M_0) e^{-sh}} r \right) e^{-sh}$$

Як бачимо, із зростанням точності моделі різниця $(P_0 - M_0)$ в знаменнику прагне до нуля і з передавальної функції системи виключається запізнення, яке тільки додається до вже отриманого результату регулювання.

Ефект від застосування предиктора залежить від багатьох факторів, що впливають на точність прогнозу стану об'єкта керування, а саме достовірність інформації про поточний стан регульованої величини та адекватність моделі об'єкта керування, що використовується при побудові предиктора. На практиці завжди існують невизначеності, які суттєво впливають на точність прогнозування в предикторі, що призводить до збільшення помилки регулювання.

За допомогою топологічних перетворень структурних схем можна отримати багато еквівалентних між собою структур систем з предиктором Сміта. Найбільш поширеною модифікацією предиктора Сміта в системах автоматичного керування є предикативний ПІ-регулятор або ППІ-регулятор [45, 52]. Слід відміти, що ППІ-регулятор відрізняється від звичайного ПІ-регулятора тільки тим, що замість одиниці в чисельнику виразу стоїть зображення запізнення e^{-sh} . Проте регулятор, базований на формі предиктора Сміта дуже чутливий до варіацій значення запізнювання. Крім того, він гарно виконує стеження за уставкою, але погано відпрацьовує по каналу зовнішнього збурення.

1.3.4. Основні положення теорії H_∞ -керування

Стандартна задача H_∞ -керування, часто називається задачею мінімізації енергії виходу [29, 73, 75] пов'язана з наступною структурною схемою багатомірної системи керування, зображеної на Рис. 1.11.

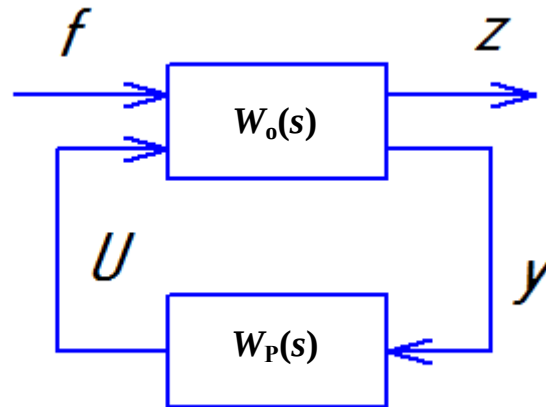


Рис. 1.11. Структурна схема задачі H_∞ -керування

На цій схемі вектор f являє собою вектор зовнішніх збурень, вектор y – вектор вимірюваного входу, вектор U – вихідний вектор регулятора та z – вектор помилки, котрий потрібно мінімізувати. Матриця передавальних функцій W_o являє собою не тільки сам об'єкт, яким потрібно керувати, але й вагові функції, які додані для забезпечення потрібної якості. Об'єкт такого роду W_o називається узагальненим об'єктом.

Стандартна задача побудови H_∞ -оптимального керування полягає в побудові керування U , мінімізуючого H_∞ -норму передавальної функції W_{zf} замкненої системи від входу f до виходу z , тобто

$$\|W_{zf}\|_\infty \rightarrow \min$$

Часто оптимальну задачу замінюють субоптимальною: побудувати керування U , яке відповідає нерівності

$$\|W_{zf}\|_\infty \rightarrow \gamma_{opt}$$

де γ_{opt} – мінімальне значення зі значень γ в нерівності $\|W_{zf}\|_\infty < \gamma$.

Вхід-вихідне співвідношення можна записати наступним виразом у формі простору часу:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ u \end{bmatrix}$$

З іншого боку в часовій області мінімальну реалізацію об'єкта можна записати у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 f(t) + B_2 u(t); \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} f(t) + D_{12} u(t); \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} f(t) + D_{22} u(t); \\ u(t) = Ky(t). \end{cases}$$

Тут X – вектор стану, u – вектор вимірів, z – вектор контролюємих виходів, u – вектор керування, f – зовнішній вхід системи.

Результати теорії H_∞ -оптимального управління, отримані класичною методикою, були своєрідним завершенням першого етапу її розвитку (початого ще роботами [43]). Крім того їх важливе значення полягало в підтвердженні факту існування рішення задачі, що дозволило використовувати для його пошуку інші, в тому числі відомі раніше методи, в результаті чого і з'явилося новий напрямок – підхід 1988 року. Тут для побудови регулятора, який би забезпечив окрім стабілізації об'єкта деяке задане значення (уназивається рівнем толерантності або рівнем терпимості того факту, що рішення не оптимальне), необхідно вирішувати два незалежних узагальнених рівняння Ріккати, які супроводжують задачу оптимального керування та задачу фільтрації. Тому такий спосіб вирішення задачі отримав назву «два-Ріккати підхід».

Відповідно до вибраного рівня толерантності, цей спосіб дає лише субоптимальне рішення. Але, замість задачі пошуку $\min$, він має справу з задачею аналізу системи при заданому значенні γ , що значно спрощує алгоритм самої процедури, тим більше, що вона в цьому варіанті повністю знаходиться в рамках простору станів. Більш того, маючи можливість як завгодно точно

наближати γ до $\gamma_{\min}$, цей спосіб дозволяє отримати таке субоптимальне рішення, яке практично співпадає з оптимальним.

Два-Ріккаті підхід не тільки дозволяє спростити алгоритм пошуку оптимального рішення в порівнянні з підходом 1988 року, але і отримати регулятор, порядок якого рівний порядку об'єкта управління, в той час коли порядок «класичного» регулятора зазвичай буває значно вищим.

Підхід 1988 року дуже схожий на розвинуту в 60-ті роки лінійно-квадратичну Гаусівську проблему. В LQG -задачі оптимізація виконується по квадратичному критерію, і виявилось, що LQG -проблема дуже близька до проблеми мінімізації H_2 -норми. В останньому випадку також вирішуються два рівняння Ріккаті, хоча і більш простого вигляду, ніж в H_∞ -варіанті. H_2 регулятор легко отримується з H_∞ -регулятора, тобто в деякому сенсі H_2 -регулятор можна розглядати як частковий випадок H_∞ -регулятора.

В два-Ріккаті підході доводиться вирішувати узагальнені алгебраїчні рівняння Ріккаті:

$$A^T X_\infty + X_\infty A - X_\infty [B_2 B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T] X_\infty + C_1^T C_1 = 0$$

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T - Y_\infty [C_2^T C_2 - \gamma^{-2} C_1^T C_1] Y_\infty + B_1 B_1^T = 0$$

де матриці A , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 – відомі матриці представлення об'єкту в просторі станів, γ – параметр, що обмежує H_∞ -норму замкненої системи.

Такий метод вирішення стандартної задачі мінімізації енергії виходу, на сьогоднішній день є стандартом рішення задач H_∞ -оптимізації. Використання H_∞ -норми передавальної функції в якості критерію оптимальності засновано на тому факті, що ця норма – верхня грань коефіцієнта підсилення системи між 2-нормою входу та 2-нормою виходу. Тому H_∞ -норма – це корінь квадратний з енергії виходу при подачі на вхід збурення з одиничною енергією. Таким чином мінімізація H_∞ -норми означає мінімізацію енергії помилки для найгіршого випадку вхідного збурення.

Головною особливістю H_∞ -регуляторів є те, що в процесі функціонування робастної системи використовується тільки апріорна інформація про можливі

зовнішні збурення. Це призводить до того, що робастні системи характеризуються деяким консерватизмом. Пояснюється це тим, що робастні системи повинні залишатись роботоздатними, тобто зберігати робастну стійкість та заданий рівень якості при максимально допустимих збуреннях, "не знаючи", коли це збурення відбудеться. Іншими словами, регулятор завжди готовий до найгіршого випадку. Це є загальною характерною особливістю всіх мінімаксних регуляторів, до яких відноситься і H_∞ -регулятор.

Традиційно в рамках цієї теорії розглядається задача подавлення невимірюваних зовнішніх збурень, які є зникаючими функціями часу (кінцевої енергії). Постановка цієї задачі є суто математичною та мало пов'язана з практичними проблемами, що постають перед інженерами-проектувальниками.

1.3.5. Методи налаштування регуляторів з використанням моделі об'єкта управління

Коли є можливість точної ідентифікації об'єкта керування, то можна уникнути процедури складного налаштування системи керування, якщо використати регулятор з внутрішньою моделлю. Така ідея є відправною точкою для подальших розробок, які згодом стали називатися керуванням із внутрішньою моделлю або *ІМС* (від англ. *Internal Model Control*), тому що модель об'єкта є явною внутрішньою частиною регулятора.

У літературі було запропоновано велику кількість методик налаштування регуляторів із використанням моделі об'єкта управління [11, 12, 13, 14, 20, 24, 30, 36, 37, 62, 78, 79].

Принцип керування з використанням внутрішньої моделі базується на твердженні, що керування буде ефективним тоді, коли система в певній мірі включає в себе особливості об'єкта, яким керує. Тобто, якщо регулюючий блок включає в себе модель об'єкта, то теоретично можлива ідеальна якість керування (відсутність перерегулювання, коливальності процесу, мінімальний час регулювання).

Суть подібного підходу полягає в тому, що ідентифікація моделі об'єкта та введення її до складу регулятора приведе до високоякісної реакції на зміну завдання, при цьому якісно реагуючи на зовнішні збурення.

Ідею *IMC* пояснює Рис. 1.12.

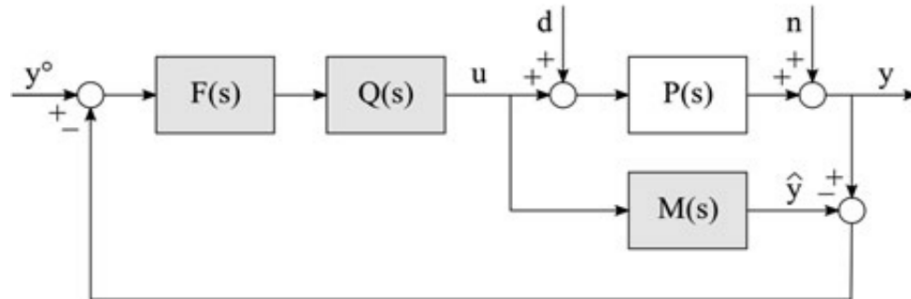


Рис. 1.12. Структура *IMC*

Розглянемо випадок об'єктів із самовирівнюванням. Якщо модель є точною і відсутні збурення з боку регулюючого органа d і шуми вимірювання n , то очевидно, що вихідний сигнал об'єкта y рівний виходу з моделі $\hat{y}$ і система є розімкнутою, а передавальна функція каналу завдання – $F(s)Q(s)P(s)$. Якщо $Q(s)$ є точною оберненою передавальною функцією об'єкта керування $P(s)$, то бажана динаміка замкнутої системи може бути довільною залежно від вибраної $F(s)$.

IMC метод дозволяє отримати спрощені методи налаштування. В літературі при розгляді методів *IMC* усе більше звертають увагу на проблеми, пов'язані з моделлю об'єкта.

У роботі [27] показано, що знаючи точну модель об'єкта, можна управляти об'єктом без зворотного зв'язку. У даній роботі описаний принцип «ідеального управління», який настає тоді, коли регулятор має передавальну функцію, що точно обернена до передавальної функції моделі об'єкта. Тут також було отримано передавальні функції за усіма можливими каналами в структурі *IMC* та сказано, що потрібно зробити, щоб зменшити вплив збурень на вигляд перехідних процесів. Був показаний зв'язок із класичними ПД регуляторами та *IMC* регулятором та введено поняття функцій чутливості.

У [28] введено задачі H_2 та H_∞ керування та умови, які повинні виконуватися, щоб досягти робастної стійкості та робастного керування. Показано, що взаємозалежність функцій чутливості є головною перешкодою для одночасного виконання умов робастної стійкості та робастного керування. Також були введені умови, при яких система є стійкою, і зв'язок між *ІМС*-структурою та класичною структурою системи керування із зворотним зв'язком. Наведено зв'язок між функціями чутливості та робастним керуванням. Окреслено можливість створення регулятора з двома ступенями свободи, який дозволяє незалежно відпрацьовувати завдання та компенсувати вплив збурень. Детально описано про принцип «ідеального управління» та причини, через які цей принцип не може бути реалізованим.

Декілька дослідників запропонували процедуру синтезу регулятора, використовуючи $\pi(\omega)$ -області довільної форми для відображення невизначеностей у моделі [22].

У роботі [38] розглянуто найбільш часто вживані інтегральні показники якості, прямі показники якості перехідних процесів у часовій та частотній областях та умови робастної стійкості. Запропоновано модифікований *ІМС* синтез для покращення перехідних процесів за каналом зовнішні збурення-вихід для об'єктів із великими сталими часу. Головною ідеєю такого методу є скорочення відповідних полюсів характеристичного рівняння. У роботі аналітично виведено формули для налаштування регуляторів, разом із умовами робастної стійкості.

Ідеї, які розглядаються в робастній теорії управління, врешті-решт були застосовані й для ПІД-регулювання. Таке проникнення призвело до появи методів, які називаються робастне ПІД-регулювання. У цьому випадку, розрізняють отримання робастного ПІД-регулятора, який є результатом розв'язку задачі робастного керування для обмеженої структури регулятора. Оскільки налаштування ПІ- та ПІД регуляторів найчастіше використовуються на практиці, то було приведено методи ПІД налаштування на основі *ІМС* синтезу [10, 23, 31, 35].

Використовуючи ідею скорочення найповільнішого полюса у [18] запропоновано покращений *ІМС* фільтр для процесів без запізнення та об'єктів першого порядку із малим часом запізнення, яке може бути апроксимоване рядом Паде. Більш глибокі методи налаштування ПІД регуляторів, що базуються на *ІМС* синтезі, для покращення перехідних процесів за каналом збурення-вихід були запропоновані у [33].

У роботі [44] розглянуто робастну стійкість та робастне керування, що базуються на нормі системи, характеристиках синтезу та параметризації контролера; введено необхідні та достатні умови для досягнення робастної стійкості та керування. Розглянуто робастність системи першого порядку із запізненням.

У статті [7] наведена аналітична процедура *ІМС* синтезу. Основна частина статті побудована на прикладах синтезу *ІМС* регуляторів для різноманітних об'єктів – із самовирівнюванням, без самовирівнювання, процеси зі стохастичними збуреннями, об'єкти із запізненням, об'єкти із домінантною сталою часу.

У [53] розглянуто переваги *ІМС* структури та основи *ІМС* синтезу, взаємозв'язок між цією структурою та класичною структурою із регулятором зворотного зв'язку. *ІМС* синтез дозволяє отримати налаштування ПІД регулятора.

Існують також методи, які базуються на інтерполяції результатів, отриманих методами чисельної оптимізації. Найбільш успішним прикладом такого підходу є *AMIGO PI*, запропонований у [17], і є так би мовити межею між класичним методом і методом *MIGO*, запропонованим вищезгаданими авторами. Для *MIGO* передавальна функція об'єкта повинна бути відомою, у той час як *AMIGO* використовує такі параметри – коефіцієнт передачі, час запізнення, сталу часу і похідну в точці перегину, які отримуються із перехідної характеристики об'єкта із самовирівнюванням. Метою *AMIGO* є таке збільшення сталої інтегрування, при якій обмежується функція чутливості для

вирішення компромісу між якістю керування та робастністю. Метод застосовується для об'єктів із самовирівнюванням та без нього.

В [32] розробляються методи на основі *ІМС*, де результуючі налаштування залежать від параметра, який прямо впливає на робастність системи. Але така робастність не очевидно пов'язана із робастною властивістю або кількісним показниками робастності. З іншого боку, є методи, вперше описані в [5], які присвячені отриманню заданих запасів стійкості по підсиленню та фазі, і дали поштовх розвитку багатьом варіантам та доповненням. У цьому випадку, параметр налаштування прямо впливає на бажану робастність замкненої системи. Ідея, яка зараз широко застосовується, полягає у використанні максимуму функції чутливості M_S , що є обґрунтованим показником робастності. Тут також можна розрізняти підходи, де намагаються отримати задане значення M_S [5], та більш гнучкі підходи, що дають методи налаштування, які залежать від необхідного значення M_S [1, 2].

У [39] запропоновані налаштування робастного *ІМС*-регулятора для відстеження заданого значення. Обрано два користувацьких параметри: бажаний час регулювання в замкнутій системі для управління швидкістю реакції та фактор для прямого налаштування робастності. Основною перевагою таких правил налаштування є підвищена ступінь свободи для синтезу, але в той же час, це можна вважати і його недоліком. Немає чітких керівних принципів для визначення цих параметрів, які іноді можуть бути заплутаними.

Розглянуті вище методи включають явний розгляд робастності в своєму принципі. Розрізняють загальні методи налаштування, де отримують робастну систему управління, але при цьому не прив'язуються до будь-якого показника робастності, і підходи, де використовуються явні терміни та означення робастності, для того щоб виміряти робастність, яка є бажаною для замкненої системи.

Використання методу *ІМС* має свої переваги та недоліки. Головною перевагою є те, що замкнута система може бути змодельована ще до застосування регулятора на реальному об'єкті. Це означає, що можуть бути

перевірені не лише такі властивості як стійкість, якість керування і робастність, але і прямі показники якості отриманих перехідних процесів, наприклад, динамічне відхилення та час регулювання. Іншою перевагою використання такої процедури є те, що маючи модель об'єкта можуть бути передбачені певні показники якості функціонування замкненої системи.

До недоліків таких методів можна віднести залежності налаштування регулятора від параметрів моделі об'єкта. Це призводить до збільшення похибки моделі, що несприятливо впливає на прогнозування виду перехідного процесу, а інколи навіть на оцінку структурних властивостей, таких як стійкість. Також, при нанесенні збурень для отримання вимірювань потрібно зважати на технологічні обмеження. Тобто модель необхідно отримати з обмеженої кількості зашумлених даних.

1.4. Висновки та постановка задачі дослідження

На основі проведеного огляду та аналізу проблем керування прямоточним котлоагрегатом можна зробити наступні висновки:

- Прямоточний паровий котел, як і переважна більшість енергетичних об'єктів є складним з точки зору керування. Він характеризується великою інерційністю та має значне запізнювання.
- В описі такого об'єкта наявні певні невизначеності, зумовлені рядом факторів, основними з яких є зміна теплового навантаження енергоблоку та невраховані перехресні зв'язки.
- Зміна навантаження є стохастичною функцією часу протягом доби, що призводить до частих змін параметрів об'єкта керування і вимагає побудови робастних систем керування.
- Існує велика кількість методів робастного керування, проте, класичні методи налаштування регуляторів ефективні в основному на "зручних" об'єктах керування, тобто таких, які описуються математичними моделями з високою достовірністю, мають гарну керованість (невелике

відношення τ/T), характеризуються стабільністю режимів, мають чіткі і однозначні збурення, не мають обмежень.

На підставі вищезазначених висновків сформульовано мету дисертаційного дослідження: підвищення якості та надійності роботи водо-парового тракту котлоагрегата шляхом розробки робастної системи керування його тепловими режимами в умовах зміни параметрів устаткування. Побудова такої системи повинна мати теоретичне обґрунтування та висновки, і в той же час має бути зрозумілою та прийнятною для інженерів.

Згідно з поставленою метою потрібно вирішити наступний ряд наукових задач:

- дослідження статичних та динамічних властивостей ділянок водо-парового тракту котлоагрегата як об'єктів керування, ідентифікація та побудова математичних моделей;
- розробка методики синтезу регулятора з внутрішньою моделлю на базі H_∞ -норми замкненої системи;
- отримання залежностей основних показників якості функціонування системи від параметрів регулятора;
- дослідження меж робастності отриманого регулятора;
- синтез робастної системи з заданими показниками якості для інерційних контурів водо-парового тракту прямоточного котлоагрегату;
- розробка програмно-технічного комплексу, який дасть змогу отримати синтезований регулятор і реалізує робастне керування з заданою якістю на основі створених методик.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДІЛЯНОК ВОДО-ПАРОВОГО ТРАКТУ КОТЛА

2.1. Феноменологічна модель водо-парового тракту котла

Необхідність дослідження процесів, що протікають у сучасних технологічних процесах, потребує створення їх моделей. Зазвичай під моделлю технологічного об'єкта розуміють систему фізичних законів та технологічних вимог, яка з достатньою точністю описує внутрішні і зовнішні зв'язки об'єкта [71].

Застосування математичного апарату дає можливість представити модель об'єкта у вигляді системи рівнянь і нерівностей, яку прийнято називати математичною моделлю технологічного об'єкта. Вигляд моделі та її точність визначаються цілями створення моделі об'єкту. Тому враховують одні сторони процесів, які протікають в об'єкті дослідження, та нехтують іншими. Остаточний висновок про точність створеної моделі можна зробити тільки на базі експериментів та безпосередньої експлуатації системи керування.

Більшість теплоенергетичних об'єктів, таких як котли, реактори, турбіни, парогенератори та інші, є складними багатоелементними агрегатами, розрахунок статичних та динамічних характеристик яких при конструюванні здійснюється по наближеним фізико-математичним моделям, що не враховує всієї сукупності величин, що на них впливають.

Основна схема моделювання теплоенергетичними об'єктами є наступною. Весь технологічний процес розбивають на окремі ділянки. Кожну ділянку математично описують на основі:

- рівняння матеріального балансу, рівнянь балансу енергії та рівнянь руху;
- геометричних та теплофізичних характеристик обладнання;
- теплофізичних властивостей робочих середовищ (води, пари, газів), що циркулюють на виділеній ділянці;

- експериментальних даних та емпіричних залежностей;
- початкового стану обладнання та робочого середовища (початкові умови) та значень параметрів на границі ділянки (граничні умови);
- обмежень, які накладаються вимогами технології процесу.

Детальне вивчення роботи обладнання та самого технологічного процесу дозволяє визначити зв'язки, які існують між окремими ділянками. Зазвичай в теплоенергетичних установках послідовність ділянок визначається ходом робочого тіла.

Самі моделі можна розділити на два класи: з зосередженими параметрами та з розподіленими параметрами. Моделі з зосередженими параметрами не враховують протягності технологічного об'єкта в просторі та характеризуються системою звичайних диференціальних рівнянь. Моделі, які враховують протягність об'єкту, описуються, як правило, рівняннями з частковими похідними. Переважна більшість існуючих моделей з розподіленими параметрами – одномірні, тобто параметри моделі залежать від однієї просторової координати. Такі моделі представляють системою рівнянь із частинними похідними, вводячи елемент запізнення.

Аналітичні методи визначення динамічних характеристик об'єктів засновані на складанні їх диференціальних рівнянь, які базуються на використанні фізичних законів збереження маси, енергії і кількості руху. Таким шляхом вдається отримати нелінійне рівняння динамічної характеристики, однак вирішити його аналітично не вдається [82].

Наступним етапом є лінеаризація рівняння, тобто перехід до лінійної математичної моделі об'єкта. Лінеаризацію зазвичай проводять розкладанням нелінійних залежностей у ряд Тейлора в наближенні вихідного стаціонарного режиму із збереженням тільки лінійної частини розкладання і подальшим відніманням рівнянь статики. Отримана таким чином лінійна модель об'єкта справедлива при малих відхиленнях від вихідного стаціонарного режиму. Рішення рівняння при ступінчастій зміні вхідних величин дозволяє отримати

перехідні функції – криві розгону. Рішення часто призводить до області зображень Лапласа, в результаті чого виходять передавальні функції.

Основна увага при дослідженні температурного режиму паротурбінного блоку приділяється водо-паровому тракту котла. При використанні для цих цілей моделюючих установок, зручно розбити водо-паровий тракт на ряд послідовно включених елементів зі зворотніми зв'язками і досліджувати їх динамічні властивості окремо.

Для побудови моделі процесів, що протікають в водо-паровому тракті, використана феноменологічна модель, заснована на рівняннях тепломасопереносу та змішування [69, 86]. Процес нагрівання пари в загальному випадку описується набором наступних диференціальних рівнянь:

- закон збереження маси;
- закон збереження енергії;
- закон збереження кількості руху.

Закон збереження маси описується рівнянням

$$D' - D'' = \frac{d(\rho \cdot V)}{d\tau} \quad (2.1)$$

де D' – витрата середовища на вході на поверхню нагріву, кг/с; D'' – витрата середовища на виході з поверхні нагріву, кг/с; ρ – щільність середовища, кг/м³; V – об'єм середовища, м³.

Рівняння закону збереження енергії має вигляд:

$$D' \cdot I' - D'' \cdot I'' + Q_B = \frac{d(\rho \cdot V \cdot i)}{d\tau} \quad (2.2)$$

де I' – кількість теплоти за одиницю часу на вході на поверхню, Дж/кг; I'' – кількість теплоти на одиницю часу на виході з поверхні, Дж/кг; Q_B – кількість теплоти в одиницю часу, отримане від зовнішнього середовища (металу).

Рівняння закону збереження кількості руху має вигляд:

$$P' - P'' = \xi \frac{D^2}{2\rho f^2 g} = kD^2 \quad (2.3)$$

де P' – тиск середовища на вході в поверхню, Па; P'' – тиск середовища на виході з поверхні, Па; f – площа прохідного перетину, м²; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Для металу використовується рівняння закону збереження енергії наступного вигляду:

$$C_M \cdot M_M \cdot \frac{d\theta_M}{dt} = Q_2 - Q_1 \quad (2.4)$$

де C_M – теплоємність металу, Дж/(кг°C) ; M_M – маса металу, кг; Q_2 – кількість теплоти в одиницю часу, що сприймається металом, Дж; Q_1 – кількість теплоти в одиницю часу, що віддається металом середовищу.

До переліку поверхонь нагріву, що моделюються відносяться: настінний пароперегрівач, стельовий пароперегрівач, конвективний пароперегрівач, крайні ширми, середні ширми, економайзер. У кожній з поверхонь відбувається нагрів робочого середовища через стінки теплообмінника. З метою спрощення задачі моделювання теплоносій вважається однофазним. Коефіцієнт теплопровідності приймається досить великим для того, щоб вважати температуру поверхні однаковою в усіх точках і рівною температурі θ_M .

Аналітичне отримання математичних моделей ділянок водо-парового тракту ускладнюється неоднорідністю матеріального потоку всередині труб, наявності зони переходу фаз (що переміщується по тракту в залежності від навантаження), особливостями використання вугільного палива (режим горіння у топці) та іншими невизначеностями [81], тому на практиці числові значення визначеного виду моделей знаходять шляхом проведення експерименту та апроксимації отриманих результатів.

2.2. Ідентифікація динамічних характеристик ділянок водо-парового тракта котла по експериментальним даним

Топкові процеси, які залежать від таких факторів як фізико-хімічні реакції горіння, динаміка руху і взаємодії фаз та конструктивні особливості топки, погано піддаються точному кількісному визначенню. Тому їх опис доводиться

проводити виходячи з достатньо загальних теоретичних викладок та експериментальних даних. З іншого боку, моделі в таких системах повинні бути простими. Одна з причин цього полягає у необхідності їх отримання з обмеженої кількості інформації; друга причина – необхідність мати прості та явні правила налаштування; третя причина – можливість узагальнення основних характеристик об'єкта декількома параметрами, які мають зрозумілу фізичну суть. Застосування більш складних моделей дозволяє поліпшити якість регулювання, однак унеможливорює простий аналітичний розрахунок параметрів регулятора на підставі параметрів моделі. Тому найбільше поширення знайшли найпростіші лінійні моделі першого і другого порядку [53].

Для виконання якісного керування необхідні знання про динамічну поведінку об'єкта керування. Математичний опис може бути представлено в табличній формі або в формі рівнянь. Ідентифікація може бути структурною, коли шукається структура математичного опису об'єкта, або параметричною, коли для відомої структури знаходять величини параметрів, що входять в рівняння моделі. Коли визначаються параметри моделі з відомою структурою, то мова йде про ідентифікацію параметрів моделі.

Для розв'язання задач аналізу та синтезу системи управління теплоенергетичними об'єктами розроблялись різні математичні моделі на основі лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь, структурних уявлень і т.д. В той же час, спроби врахувати численні зв'язки та залежності між вхідними та вихідними змінними і координатами стану приводять до громіздких моделей великої розмірності, а точність моделей покращується не набагато, тим більше, що при виведенні рівнянь обов'язково приймаються спрощувальні припущення. При синтезі системи управління часто використовуються модель низького порядку. В більшості випадків такий підхід є виправданим [51], адже базується на таких засадах:

- 1) Модель низького порядку широко використовується на практиці, особливо в промисловості.

2) При використанні моделі першого порядку легко досягти бажаної структури системи, яка в результаті забезпечує хороше розуміння складних систем.

3) Неточність в моделях високого порядку в результаті призводять до більших помилок при синтезі всієї системи.

Невизначеність моделі низького порядку часто описується у формі опису невизначеностей параметрів.

При описі моделей технологічних параметрів ТЕС, зокрема котлоагрегату, структура моделей динаміки може бути самою різною. Проте, найчастіше в алгоритмах ідентифікації об'єктів управління, що розглядаються в роботах [51, 77, 79], динамічні характеристики об'єкта управління апроксимуються передавальними функціями вигляду

$$W_o(s) = \frac{k}{(Ts + 1)(\alpha Ts + 1)} e^{-\tau s}, \quad L = \frac{\tau}{T} \quad (2.5)$$

де k – коефіцієнт передачі, T – головна стала часу, α – відношення сталих часу ($0 \leq \alpha \leq 1$), τ – час запізнення, L – нормований час запізнення.

Модель (2.5) при $\alpha = 0$ описує об'єкти першого порядку з запізненням; при ($0 < \alpha < 1$) – об'єкти другого порядку з запізненням; при $\alpha = 1$ – об'єкти з парними коренями. Структура (2.5) є більш загальною, ніж ті, які використовуються у традиційних роботах із синтезу ПІ та ПІД регуляторів [6, 30, 41, 52, 80].

Розрізняють активну ідентифікацію (за допомогою впливу на систему, яка подається спеціально з метою ідентифікації) і пасивну – коли в якості впливів використовують сигнали, наявні в системі в процесі її нормального функціонування. У пасивному експерименті виробляють тільки спостереження за поведінкою системи в нормальному режимі її функціонування, намагаючись отримати з цього спостереження інформацію, достатню для налаштування регулятора.

Автоматична система регулювання перегрітої пари призначена для підтримання заданого температурного режиму в паровому тракті котла. З цією

метою паровий тракт розбивається на ряд ділянок, на виході кожної з яких повинно підтримуватися задане значення температури, що визначається заводом виробником або налагоджувальною організацією. Таким чином, об'єктом регулювання являється частина котла між точкою вводу регульовальної дії та точкою контролю регульованої температури, включаючи радіаційні та конвективні поверхні нагріву.

Розглянемо контури регулювання температури пари в нижній та верхній радіаційній частині.

В результаті проведеного пасивного експерименту були отримані перехідні характеристики температурних ділянок водо-парового тракту для другого корпусу котлоагрегата по двом ниткам "В" і "Г" при навантаженнях котла 300 МВт (Рис. 2.1) та 225 МВт (Рис. 2.2).

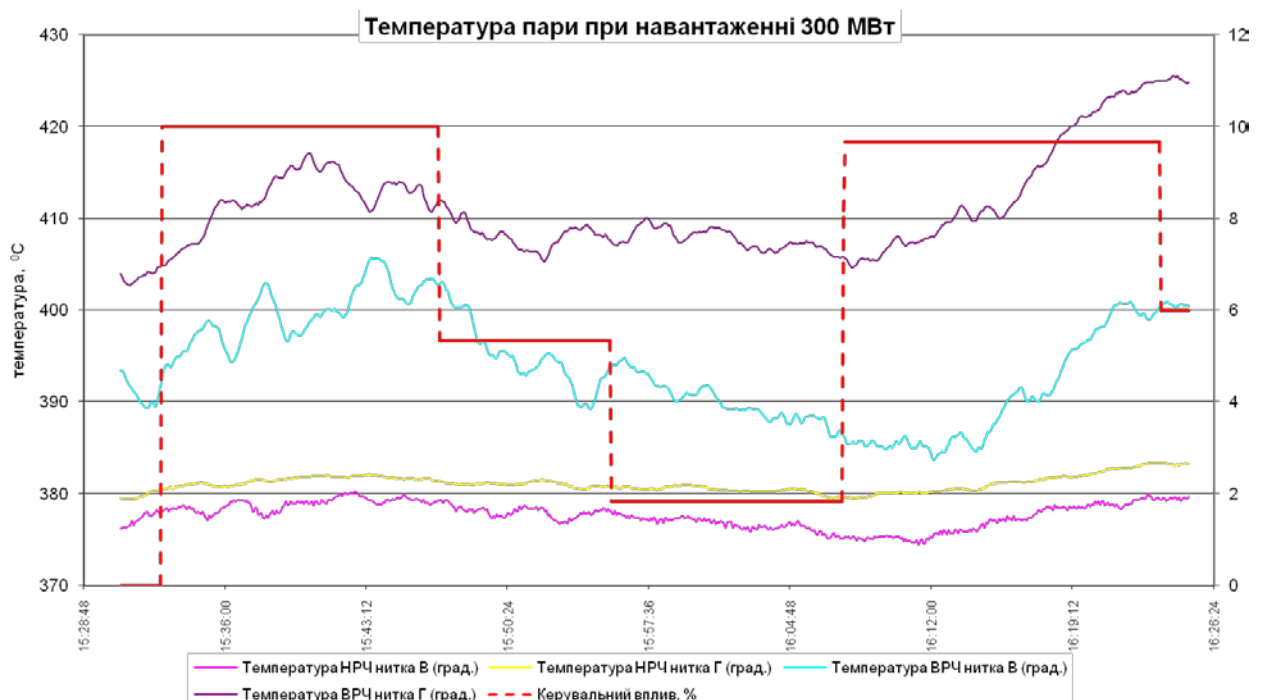


Рис. 2.1. Графіки перехідних процесів по каналам НРЧ та ВРЧ при навантаженні 300 МВт

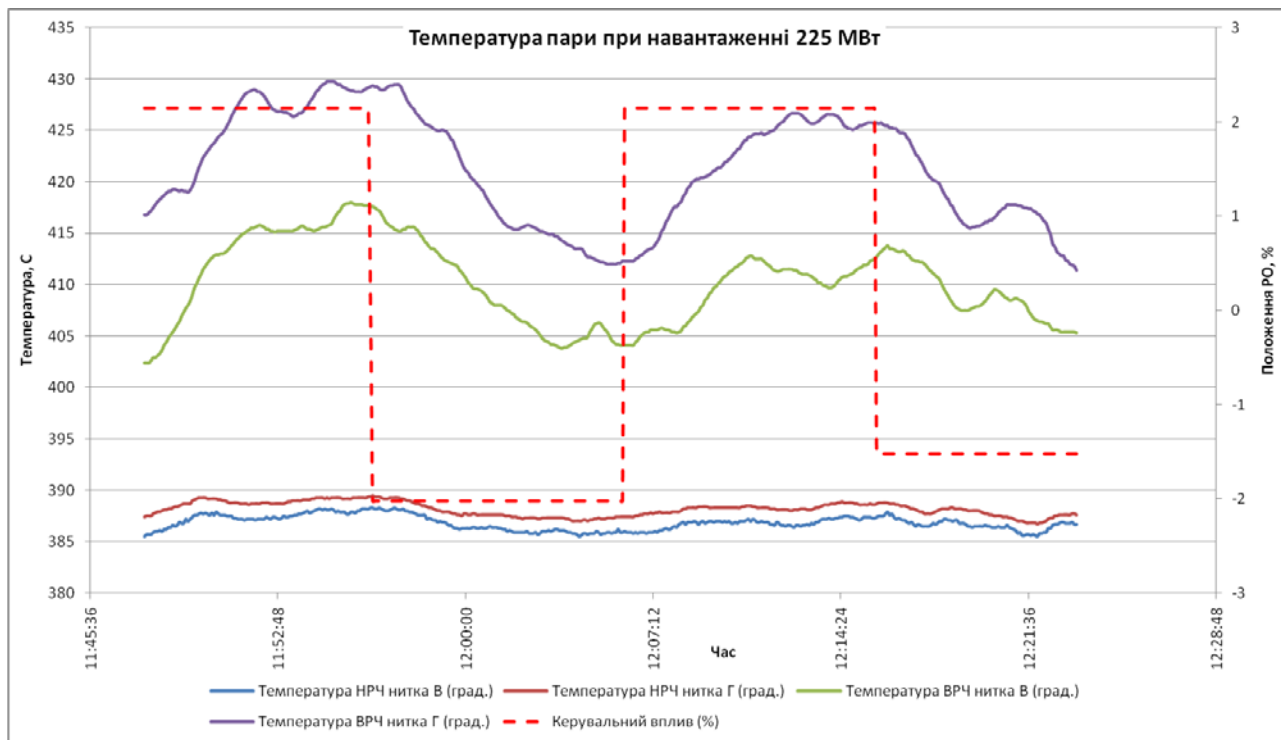


Рис. 2.2. Графіки перехідних процесів по каналах НРЧ та ВРЧ при навантаженні 225 МВт

Наявні характеристики є зашумленими, що вимагає їх фільтрації. Скористаємось фільтром Баттерворта першого порядку, так як він забезпечує найбільш плоску характеристику в смузі пропускання, що досягається ціною плавності характеристики в перехідній області, тобто між смугами пропускання і затримання.

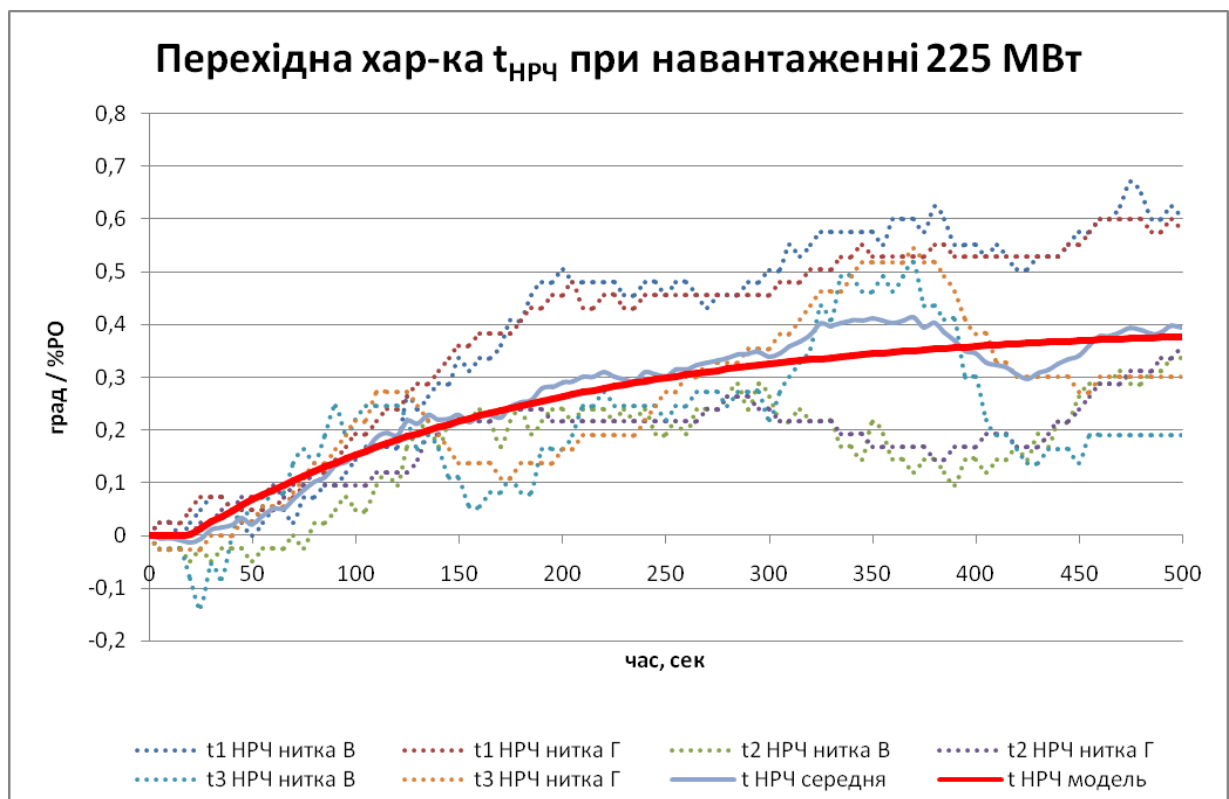
Таким чином, загальний процес ідентифікації складається із таких частин:

- 1) Розкладання перехідної характеристики в ряд Фур'є для визначення діапазону частот, які потрібно відфільтрувати.
- 2) Налаштування фільтру Баттерворта згідно з визначеним діапазоном частот і фільтрація сигналу.
- 3) Апроксимація відфільтрованого сигналу згідно мінімуму квадратичного інтегрального критерію.

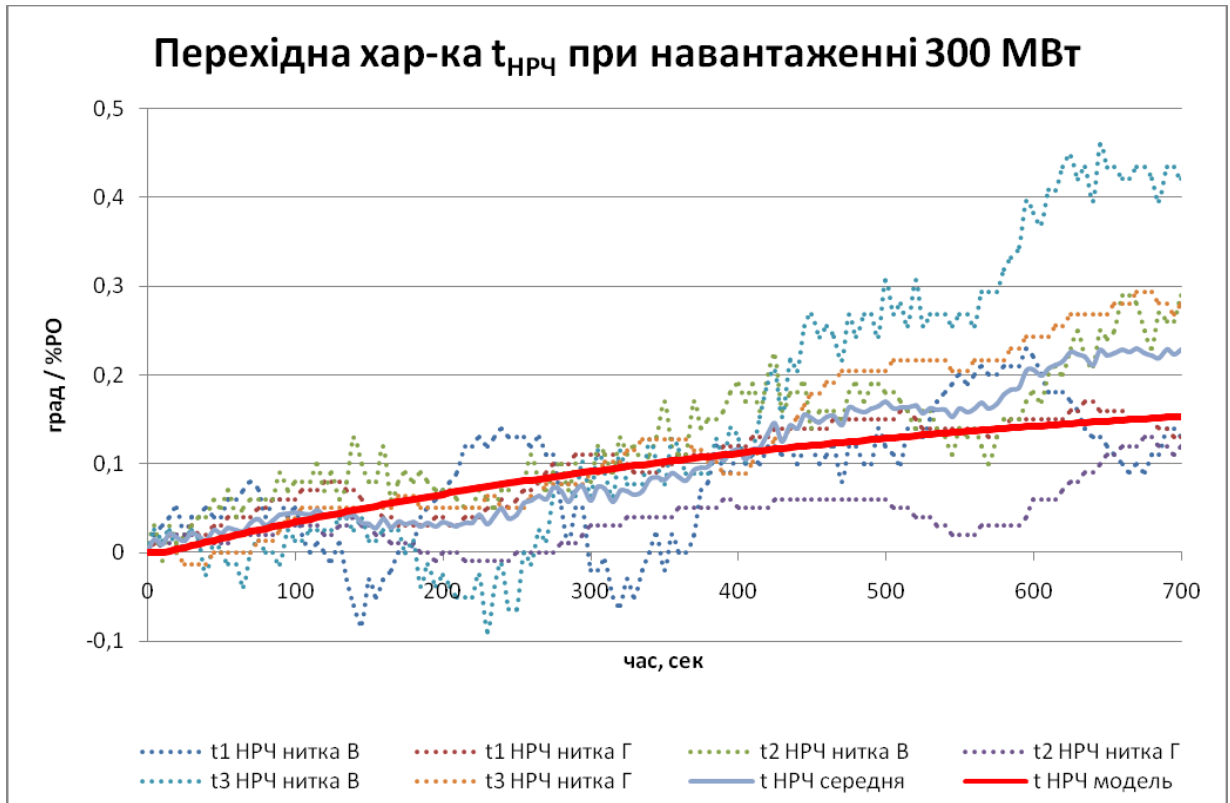
У результаті отримано значення параметрів передавальної функції (2.5), які подані у Табл. 2.1. Графічні ілюстрації перехідних процесів та їх апроксимації наведені на Рис. 2.3.

Табл. 2.1. Значення параметрів моделі

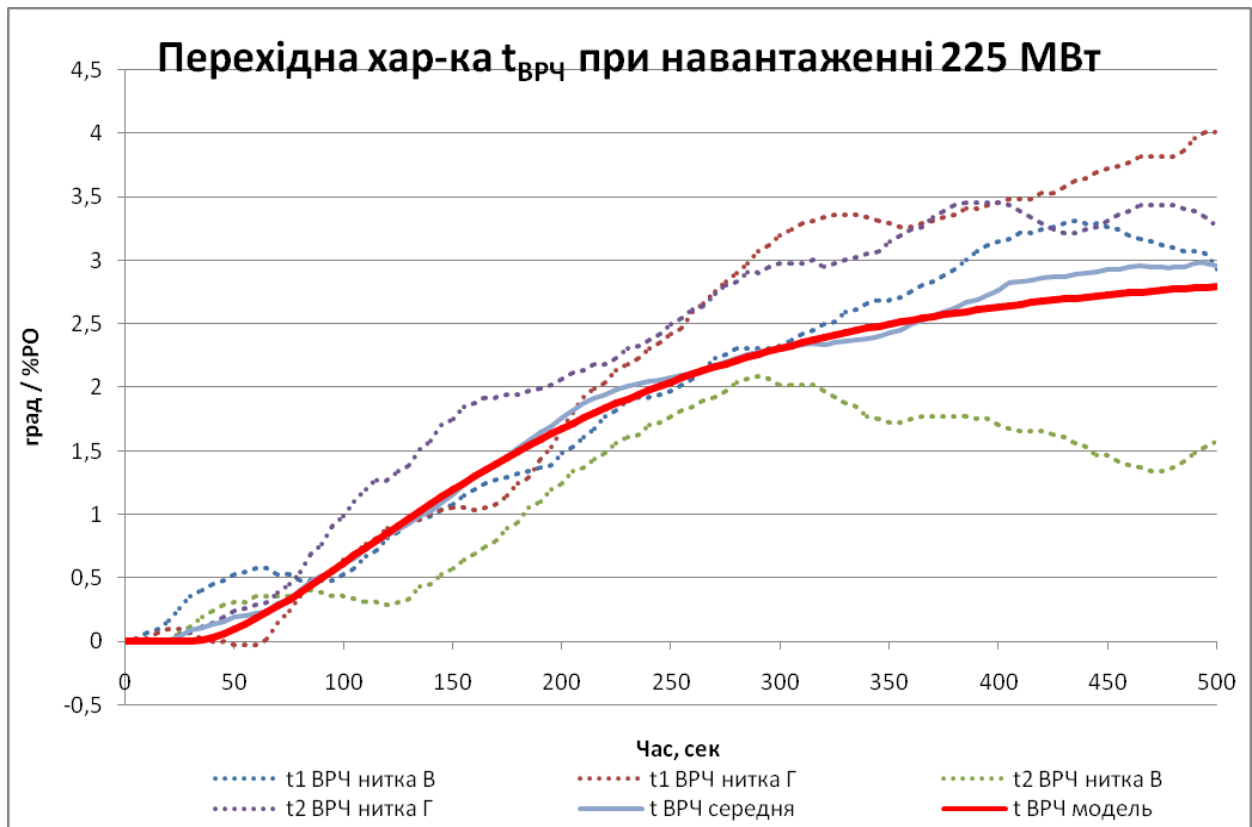
Назва параметру	Порядок моделі об'єкта	Параметри моделі об'єкта	Розмірність	Навантаження енергоблоку, МВт	
				225	300
Температура пари НРЧ, °С	1	коеф.передачі К	°С/т/год	0,4	0,2
		постійна часу Т	с	168	475
		запізнювання τ	с	19	11
Температура пари ВРЧ, °С	2	коеф.передачі К	°С/т/год	2,95	1,1
		постійна часу T_2	с	140	150
		постійна часу T_1	с	50	145
		запізнювання τ	с	26	14



а)



б)



в)

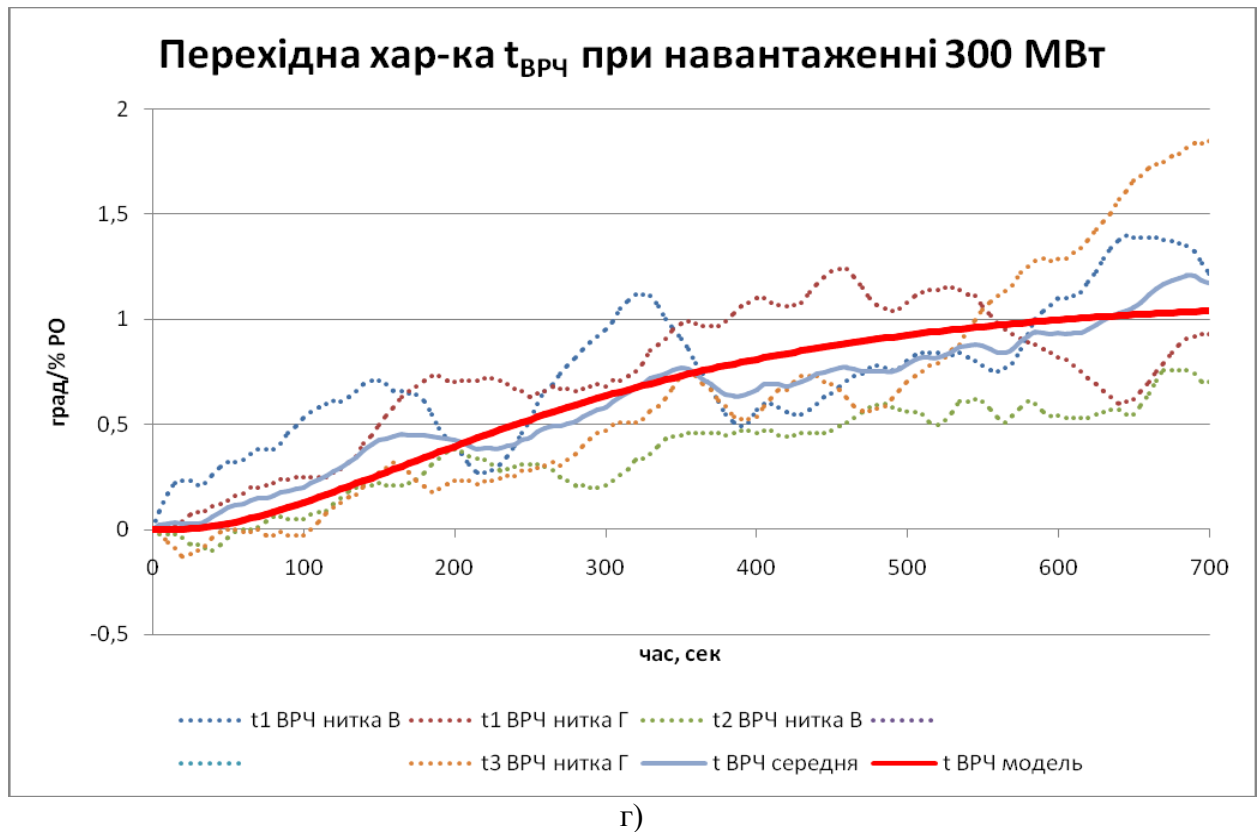


Рис. 2.3. Перехідні процеси АСК температури та їх моделі:
а, б – Температура пари НРЧ при навантаженні 225 МВт і 300 МВт;
в, г – Температура пари ВРЧ при навантаженні 225 МВт і 300 МВт.

Таким чином, передавальні функції моделей температурних контурів приймаємо у наступному вигляді:

- Температура пари НРЧ:

$$W_{\text{НРЧ}} = \frac{k_{\text{НРЧ}}}{T_{\text{НРЧ}}s + 1} e^{-s\tau_{\text{НРЧ}}} \quad (2.6)$$

де $k_{\text{НРЧ}} = [0,2 \dots 0,4]$, $T_{\text{НРЧ}} = [475 \dots 168]$, $\tau_{\text{НРЧ}} = [11 \dots 19]$.

- Температура пари ВРЧ:

$$W_{\text{ВРЧ}} = \frac{k_{\text{ВРЧ}}}{(T_2^{\text{ВРЧ}}s + 1)(T_1^{\text{ВРЧ}}s + 1)} e^{-s\tau_{\text{ВРЧ}}} \quad (2.7)$$

де $k_{\text{ВРЧ}} = [1,1 \dots 2,95]$, $T_2^{\text{ВРЧ}} = [150 \dots 140]$, $T_1^{\text{ВРЧ}} = [145 \dots 50]$, $\tau_{\text{ВРЧ}} = [14 \dots 26]$.

2.3. Перевірка моделей на адекватність

Подальше використання отриманих моделей для синтезу робастних систем керування, а також їх імітаційне моделювання можливе лише за умови адекватності цих моделей реальному об'єкту в усьому діапазоні його роботи.

Таким чином, слід встановити, наскільки добре модель описує реальні процеси, що відбуваються в системі, та наскільки якісно властивості моделі відповідають властивостям модельованого об'єкта.

Для перевірки моделей на адекватність на Трипільській ТЕС була отримана інша вибірка даних по перехідним процесам в системах водопарового тракту котла при різних навантаженнях. Результати їх порівняння з математичними моделями відповідних ділянок при мінімальному та максимальному навантаженні представлені на Рис. 2.4.

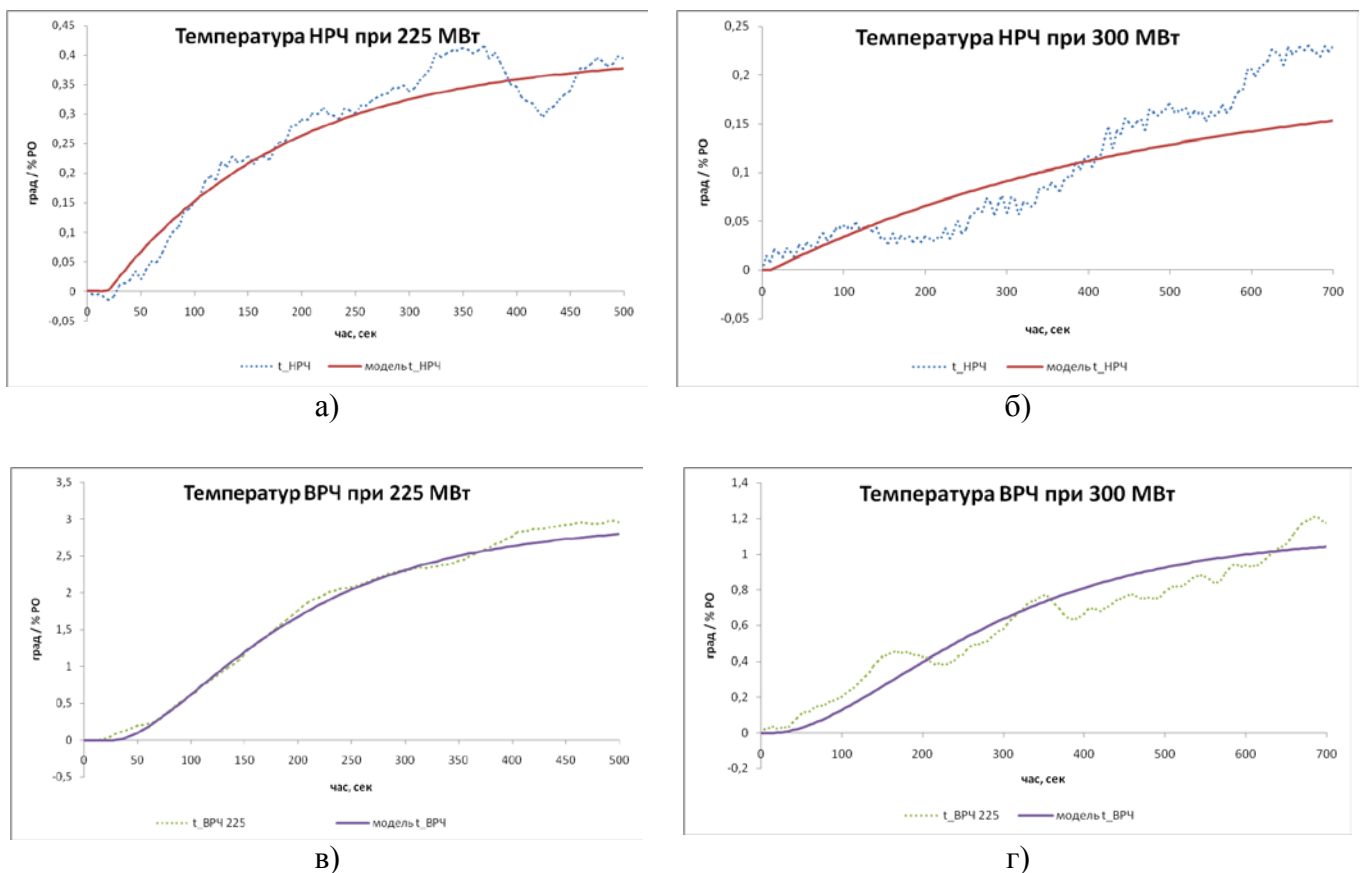


Рис. 2.4. Перехідні процеси АСК температури та їх моделі:

а, б – Температура пари НРЧ при навантаженні 225 МВт і 300 МВт;

в, г – Температура пари ВРЧ при навантаженні 225 МВт і 300 МВт.

Найбільш поширеним способом перевірки моделей на адекватність є використання методів математичної статистики. Обчислимо значення основних статистичних коефіцієнтів, які характеризують про адекватність моделі в межах певного довірчого інтервалу, а саме:

- середньоквадратичне відхилення від середнього значення – вимірює відхилення експериментальних даних від розрахованих модельних значень відповідей. Значення, близьке до 0, вказує на кращу апроксимацію;
- R^2 – коефіцієнт множинної детермінації або квадрат кореляції між експериментальними даними і розрахованими значеннями моделі. Чим ближче цей коефіцієнт до 1, тим більша частина дисперсії припадає на модель, яка тим самим є більш адекватною.
- відносний R^2 – число ступенів свободи скориговані відносно R^2 . Значення, близьке до 1 вказує на більш придатну модель. Це, як правило, кращий показник якості кореляції, ніж просто R^2 .
- корінь середньоквадратичної помилки. Значення, близьке до 0, вказує на краще прилягання.

Табл. 2.2. Значення статистичних коефіцієнтів моделі

	дисперсія	R^2	adj_ R^2	корінь СКП
модель $t_{\text{Нрч}}$ 225	0,08941	0,9458	0,9447	0,03021
модель $t_{\text{Нрч}}$ 300	0,04367	0,9394	0,9386	0,01772
модель $t_{\text{Врч}}$ 225	0,0973	0,996	0,9959	0,064
модель $t_{\text{Врч}}$ 300	0,0994	0,9438	0,9426	0,02828

Оскільки для усіх досліджуваних величин розрахункові значення статистичних коефіцієнтів не перевищують 10% від максимуму, то можна зробити висновок, що моделі процесів температурного режиму при різних навантаженнях, адекватні реальному процесу.

2.4. Апроксимація часу запізнення

Одним зі складних факторів у процесі управління є аналітичне використання часу запізнення. Це ірраціональний термін з математичної точки зору. Щоб представити його раціональною передавальною функцією, він може бути апроксимований розкладанням в ряд Тейлор або Паде. Розкладання запізнення в ряд Тейлора першого і другого порядків може бути записано як:

- перший порядок ряду Тейлора

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{1 + \tau s} \approx 1 - \tau s \quad (2.8)$$

- другий порядок ряду Тейлора

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{1 + \tau s + \frac{\tau^2 s^2}{2}} \quad (2.9)$$

Розкладання запізнювання в ряд Паде першого і другого порядку може бути записано як:

- Паде 1-го порядку

$$e^{-\tau s} \approx \frac{e^{-\frac{\tau}{2}s}}{e^{\frac{\tau}{2}s}} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{1 + \frac{\tau}{2}s} \quad (2.10)$$

- Паде 2-го порядку

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2} \quad (2.11)$$

Розкладання в ряд Паде в два рази точніше наближення за допомогою ряду Тейлора, тобто розкладення Паде 2-го порядку буде виконувати роботу 4-го порядку апроксимації Тейлора. Рис. 2.5 та Рис. 2.6 порівнюються тенденції таких наближень до реальної функції. Апроксимація Паде 2-го порядку, очевидно, дає достатню точність до критичної частоти, однак вона має складну форму, що робить таке використання недоцільним.

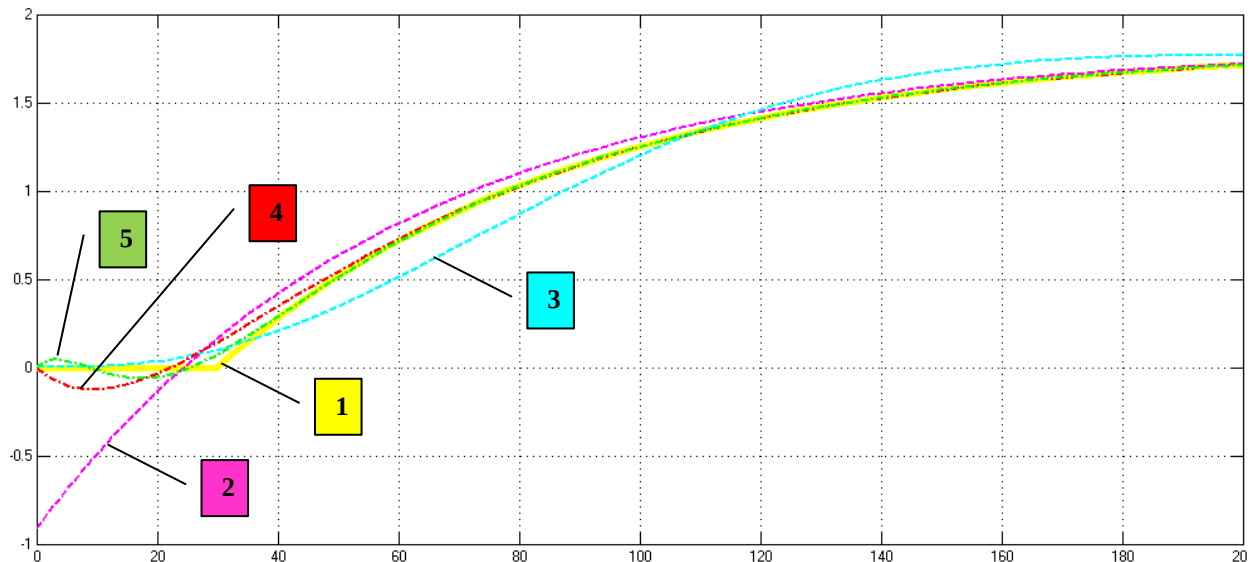


Рис. 2.5 Точність наближення запізнювання до реальної ланки для об'єкта 1-го порядку: $W(s) = 1,82e^{-30s}/(60s+1)$

де 1 – вихід об'єкта з ланкою чистого запізнювання;

2 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Тейлора 1-го порядку;

3 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Тейлора 2-го порядку;

4 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Паде 1-го порядку;

5 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Паде 2-го порядку.

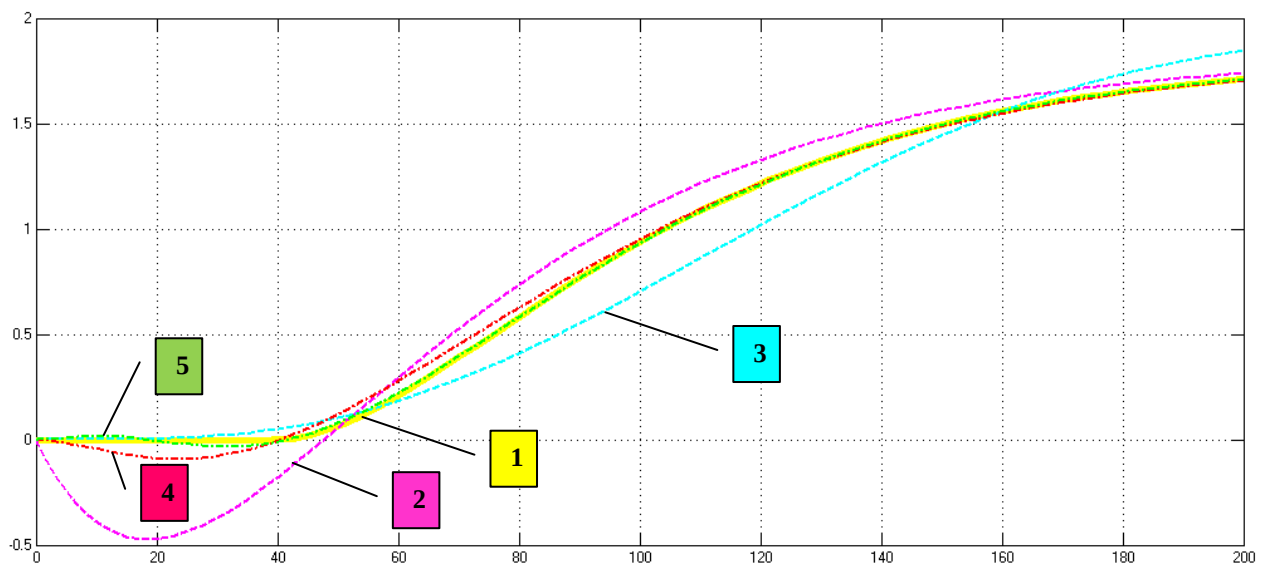


Рис. 2.6 Точність наближення запізнювання до реальної ланки для об'єкта 2-го порядку: $W(s) = 1,82e^{-40s}/(30s+1)(40s+1)$

де 1 – вихід об'єкта з ланкою чистого запізнювання;

2 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Тейлора 1-го порядку;

- 3 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Тейлора 2-го порядку;
- 4 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Паде 1-го порядку;
- 5 – вихід об'єкта з запізненням апроксимованим рядом Паде 2-го порядку.

Таким чином, при подальшому використанні функції запізнення в синтезі систем керування доцільно виконувати її апроксимацію числовим рядом Паде 1-го порядку для об'єктів 1-го порядку і апроксимацію Тейлора або Паде 1-го порядку для об'єктів 2-го порядку.

2.5. Вибір критерію оптимізації

Реальна робота дійсної АСК не може бути абсолютно точною в силу багатьох причин: наявність запізнювання в регулювальному каналі об'єкта керування, наявність обмежень на запас стійкості замкнутих контурів, обмеження на можливий діапазон зміни регулювальних змінних та ін. В процесі роботи з'являється відхилення регульованої величини від заданого значення. Для оцінки цього відхилення вводиться поняття якості процесу керування, що викликаний типовим збуренням. Зазвичай типовим збуренням обирається ступінчате, а якість перехідних процесів визначають прямими показниками якості, що гарантують необхідне протікання перехідного процесу. Якість перехідних процесів може характеризуватись багатьма показниками. Наведемо основні з них: ступінь затухання, перерегулювання, динамічна похибка, тривалість процесу регулювання. Важливим критерієм для оцінки роботоздатності системи в умовах нестабільності динамічних характеристик об'єкта керування є поняття запасу стійкості системи, який може бути охарактеризований двома чисельними величинами: запас стійкості по модулю m та запас стійкості по фазі β . Для порівняння окремих перехідних процесів зручно мати єдину узагальнену оцінку якості керування. Тому в інженерній практиці широко користуються інтегральними показниками якості. Найчастіше використовуються інтегральний квадратичний критерій (ISE), інтегральний абсолютний критерій (IAE) та ваговий абсолютний інтегральний критерій (ITAE):

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt, \quad IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.12)$$

де e – помилка регулювання.

Загалом, чим менші ці показники, тим якість керування вважається кращою.

Нові підходи робастного управління процесом походять від [28] на основі оптимізації ISE (інтегралу площі помилки) як критерію якості. Такі підходи, названі як методи "проб і помилок". Однак, можна сказати, що вже в цих підходах беруть участь деякі особливості робастного синтезу. З іншого боку, сучасні робастні і аналітичні підходи в основному вимагають деяких ітераційних модифікацій, поки досягається найкращий компроміс між суперечливими цілями. Це може бути викликано тим, що в основі синтезу за ISE -критерієм в першу чергу немає практичних вимог, а тільки математичні зручності, що, як відомо, призводить до коливальної поведінки. Незважаючи на це такий критерій широко використовується в різних сучасних підходах. Тим не менш, до цих пір не існує перевірених чітких методів для отримання робастної якості. Адже системи керування, отримані з мінімізацією інтегрального квадратичного критерію, за критерієм грубості значно поступаються системам, отриманим при мінімізації H_{∞} -сигналу помилки.

Іншим загальноприйнятим підходом до вирішення параметризованих рішень, пов'язаних з робастним управлінням є використання додаткових функцій чутливості [4, 5, 16].

Для опису якості системи керування, "розмір" певних сигналів повинен бути визначеним. "Розмір" сигналу може бути визначено шляхом введення норми. "Сигнал малий" означає, що норма сигналу мала.

Наведемо деякі норми сигналів, які часто використовуються:

1-норма. 1-норма сигналу $r(t)$ є інтегралом його абсолютного значення:

$$\|r(t)\|_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |r(t)| dt$$

2-норма. 2-норми $r(t)$ є

$$\|r(t)\|_2 = \left[\int_{-\infty}^{\infty} r^2(t) dt \right]^{1/2}$$

∞ -норма. ∞ -норма $r(t)$ є верхньою гранню його абсолютного значення:

$$\|r(t)\|_{\infty} = \sup_t |r(t)|$$

Розглянемо лінійну стаціонарну систему $w(t)$, з сигналом $r(t)$ на вході і $y(t)$ на виході. В часовій області, вхід-вихід моделі такої системи може бути виражений у вигляді згортки:

$$y(t) = w(t) r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t-\theta) r(\theta) d\theta$$

Якщо $W(s)$ – передавальна функція $w(t)$, то для системи $W(s)$ також можуть бути визначені норми:

2-норма

$$\|W(s)\|_2 = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

∞ -норма

$$\|W(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega} |W(j\omega)| \quad (2.14)$$

2-норма $W(s)$ скінченна тоді і тільки тоді, коли $W(s)$ є строго правильною і не має полюсів на уявній осі. ∞ -норма $W(s)$ скінченна тоді і тільки тоді, коли $W(s)$ є правильною і не має полюсів на уявній осі.

Для лінійної системи $W(s)$ H_{∞} -норма визначається як $\|W(s)\| = \max \sigma(W(j\omega))$, де σ – найбільше сингулярне значення $W(j\omega)$. Якщо система одновимірною, то справедливе твердження $\sigma(W(j\omega)) = |W(j\omega)|$. Таким чином, H_{∞} -норма може бути інтерпретована як верхня межа значень передавальної функції замкнутої системи.

В цілому, використання в якості критерію H_2 -норми хоч і вимагає мінімальних затрат на управління, проте призводить до погіршення якісних характеристик перехідних процесів при детермінованих збуреннях.

Для лінійних систем, в рамках оптимального керування в умовах невизначеностей, найкращі результати виходять при застосуванні H_∞ - теорії керування. При цьому невизначеність моделі штучно зводиться до входу об'єкта у вигляді збурення. Далі вирішується завдання мінімізації H_∞ -норми передавальної функції щодо чинної помилки на вході об'єкта керування, що становить предмет завдання H_∞ - оптимального управління. Фізично мінімізація H_∞ -норми передавальної функції означає мінімізацію відношення енергії контрольованої величини на виході замкнутої системи до енергії збурення на вході об'єкта. Це дозволяє зменшити залежність контрольованої величини від невизначеності моделі, яка формує збурення, а, отже, збільшити грубість системи до впливу невизначеності.

2.6. Висновки до Розділу 2

1. Для побудови робастної АСК доцільно представляти об'єкт у вигляді моделі невисокого порядку, так як для отримання точної моделі високого порядку необхідна значна кількість технічної інформації, а також проведення додаткових активних експериментів. Крім того, модель невисокого порядку уможливорює узагальнення основних характеристик об'єкта декількома параметрами, які мають зрозумілу фізичну суть. Тому динамічні характеристики об'єкта керування представляються у вигляді (2.5).
2. У результаті обробки експериментальних даних, отриманих на енергоблоці Трипільської ТЕС, при різних рівнях навантаження котлоагрегата (225 МВт і 300 МВт) розроблені динамічні моделі ділянок регулювання температури пари, а саме: НРЧ та ВРЧ по каналу «керуючий вплив (%) – температура (град.)» у вигляді передавальних функцій невисоких порядків з запізненням. Визначені коефіцієнти передачі, постійні часу та запізнення за вказаними каналами.
3. Розглядаючи роботу котлоагрегату у всьому діапазоні змін навантаження, можна класифікувати його як об'єкт зі змінними

параметрами, значення яких варіюються від параметрів при 225 МВт до параметрів при 300 МВт.

4. Отримані динамічні моделі ділянок енергоблоку мають у своєму складі ланку транспортного запізнювання. Вона представляє собою трансцендентну функцію, використання якої при аналітичному синтезі АСК викликає математичні труднощі. Уникнути вказаної проблеми можна, застосувавши розкладання функції запізнення в ряд Тейлора або Паде 1-го або 2-го порядку. Апроксимація 2-го порядку точніша, проте вона має складну форму, що робить її використання недоцільним. Тому для подальшого використання застосовано апроксимацією Тейлора або Паде 1-го порядку.
5. Існує велика кількість критеріїв якості (прямі, частотні, інтегральні), проте немає універсального, який би задовольняв усіх розробників та користувачів систем керування. В умовах існуючих невизначеностей найкращі результати виходять при застосуванні H_∞ - теорії керування. При цьому невизначеність моделі штучно зводиться до входу об'єкта у вигляді збурення. На наступному етапі вирішується завдання мінімізації H_∞ -норми передавальної функції щодо помилки чинної на вході об'єкта збурення. Це дає змогу зменшити залежність контрольованої величини від невизначеності моделі, яка формує збурення, а отже, збільшити грубість системи до впливу невизначеності.
6. Системи управління, отримані з мінімізацією інтегрального квадратичного критерію, за критерієм грубості значно поступаються системам, отриманим при мінімізації H_∞ -сигналу помилки.
7. Використання H_∞ -норми як критерію якості є доцільним в побудові робастної системи, проте він не простий для розуміння практиками. Тому слід доповнити таку методику зв'язком результатів з прямими показниками якості.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА З ВНУТРІШНЬОЮ МОДЕЛЛЮ НА БАЗІ H_∞ -НОРМИ

3.1. Параметризація регулятора з внутрішньою моделлю

Поняття стійкості характеризує здатність системи повертатися в стан рівноваги після нанесення збурення. У системі управління не можна допустити, щоб невелике збурення в одному місці призвело до появи сигналів необмеженого рівня в деяких інших місцях. В [32] показано, що необхідно забезпечити більш сувору вимогу внутрішньої стійкості, тобто гарантувати обмежені внутрішні сигнали.

Лінійна стаціонарна система управління внутрішньо стійка, якщо передавальна функція між будь-якими двома точками системи є стійкою.

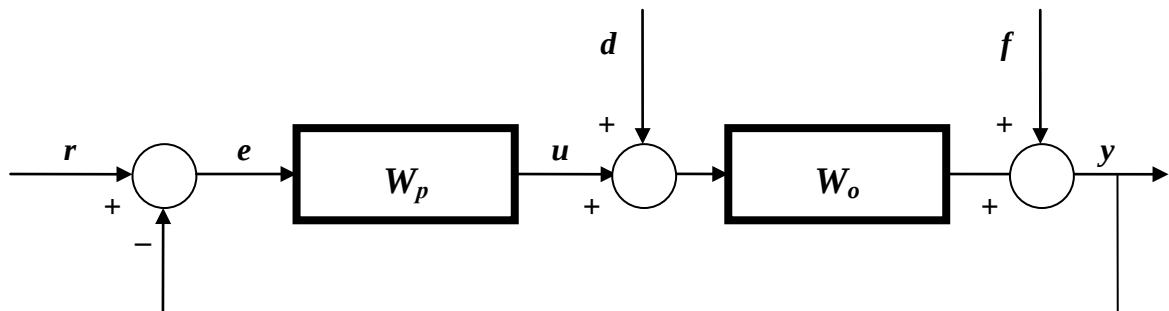


Рис. 3.1. Система управління зі зворотнім зв'язком

У системі управління, будь-які дві точки можуть бути вибрані для тестування внутрішньої стійкості, але деякі варіанти еквівалентні. У системі, показаній на Рис. 3.1, є тільки два незалежних виходи і два незалежні входи. Можна вибрати $r(s)$ і $d(s)$ як входи і $y(s)$ та $u(s)$ як виходи. Замкнута система внутрішньо стійка, тоді і тільки тоді, якщо всі елементи передавальної функції матриці $H(s)$ від $r(s)$ і $d(s)$ до $y(s)$ і $u(s)$ є стійкими:

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = H(s) \begin{bmatrix} r(s) \\ d(s) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

де

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{W_{op}(s)W(s)}{1+W_{op}(s)W(s)} & \frac{W_o(s)}{1+W_p(s)W(s)} \\ \frac{W_p(s)}{1+W_{op}(s)W(s)} & \frac{-W_o(s)W_p(s)}{1+W_p(s)W(s)} \end{bmatrix}$$

Система стійка тоді і тільки тоді, коли всі полюси її замкненої передавальної функції знаходяться у лівій напівплощині (або, що еквівалентно, замкнута передавальна функція не має полюсів в $Re s \geq 0$). У порівнянні з концепцією внутрішньої стійкості, поняття стійкості не є повним, тому що анулювання нулів і полюсів в правій напівплощині для замкненої системи не розглядається. Анулювання нуля-полюсу означає, що нуль і полюс знаходяться в одній і тій же точці. Це може відбутися в певній складовій системи (наприклад, в регуляторі) або між двома розділеними складовими (наприклад, між регулятором і об'єктом).

Розглянемо функцію чутливості:

$$S(s) = \frac{1}{1+W_{op}(s)W(s)} \quad (3.2)$$

яка описує відношення збурення $f(s)$ до виходу $y(s)$, або відношення $r(s)$ до помилки $e(s)$:

$$S(s) = \frac{y(s)}{f(s)} = \frac{e(s)}{r(s)}$$

Позначимо за $T(s)$ передавальну функцію від завдання $r(s)$ до $y(s)$, тобто передавальну функцію замкнутої системи:

$$T(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{W_{op}(s)W(s)}{1+W_{op}(s)W(s)} \quad (3.3)$$

або

$$T(s) = 1 - S(s)$$

$T(s)$ називають також додатковою або комплементарною функцією чутливості. Функція чутливості $S(s)$ показує кількісно наскільки чутлива $T(s)$ із зміною $W_o(s)$, тобто границя відношення відносного збурення в $T(s)$, $\Delta T(s)/T(s)$ до відносних змін $W_o(s)$, $\Delta W_o(s)/W_o(s)$:

$$\lim_{\Delta W_o(s) \rightarrow 0} \frac{\Delta T(s)/T(s)}{\Delta W_o(s)/W_o(s)} = \frac{dT(s)}{dW_o(s)} \frac{W_o(s)}{T(s)} = S(s)$$

Припустимо, що в замкненій системі керування об'єкт $W_o(s)$ – з самовирівнюванням. Представимо $Q(s)$, яка позначається передавальною функцією від $r(s)$ до $u(s)$:

$$Q(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_o(s)W_p(s)} \quad (3.4)$$

Тоді передавальну функцію регулятора можна виразити як

$$W_p(s) = \frac{Q(s)}{1 - W_o(s)Q(s)} \quad (3.5)$$

А матрицю $H(s)$, визначену у (3.1) перепишемо у вигляді

$$H(s) = \begin{bmatrix} W_o(s)Q(s) & [1 - W_o(s)Q(s)]W_o(s) \\ Q(s) & -W_o(s)Q(s) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Отже, при об'єкті з самовирівнюванням $W_o(s)$, система буде внутрішньо стійка тоді і тільки тоді, коли $Q(s)$ є стійкою.

Таким чином, можна стверджувати, що для всіх об'єктів з самовирівнюванням $W_o(s)$, регулятор, введений до зворотного зв'язку, забезпечує стійкість тоді, коли він виражений як (3.5), де $Q(s)$ є будь-якою стійкою передавальною функцією.

Розглянемо просте пояснення результату з точки зору структури *ІМС*, яка представлена на Рис. 3.2.

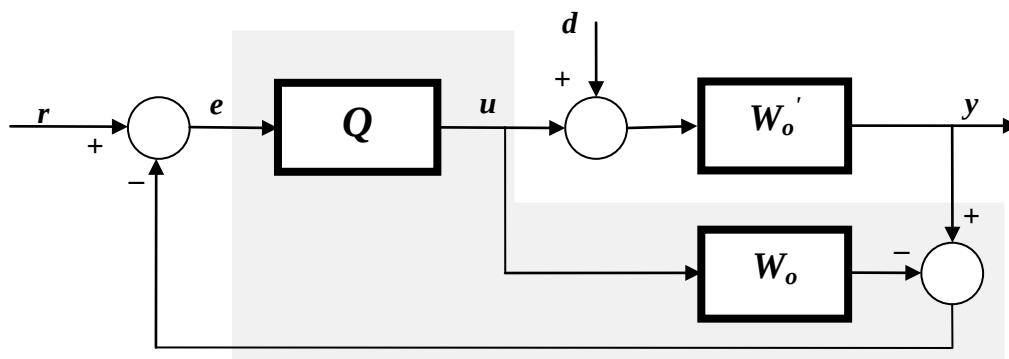


Рис. 3.2. Базова структура САК із *ІМС*

На цій схемі використані такі позначення:

W_o' – об'єкт керування, параметри якого можуть змінюватися; W_o – модель об'єкта керування, яка залишається сталою; Q – стійкий регулятор; r – сигнал завдання; d – збурення з боку регульовального органу; y – вихідний сигнал системи автоматичного керування.

За допомогою еквівалентних перетворень структуру на Рис. 3.2 можна привести до класичного вигляду системи автоматичного керування, де W_p – регулятор зворотнього зв'язку.

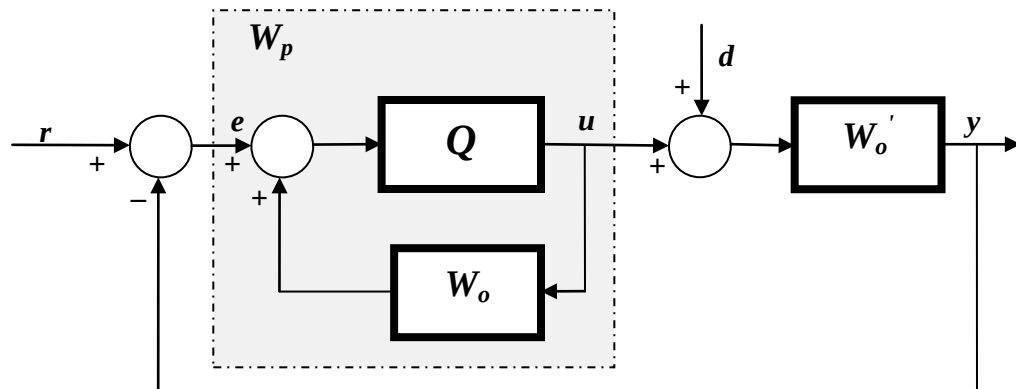


Рис. 3.3. Система із *IMC* регулятором приведена до класичного вигляду

Для системи управління зі зворотним зв'язком, згідно еквівалентному перетворенню може бути отримана нова конфігурація, представлена на Рис. 3.4.

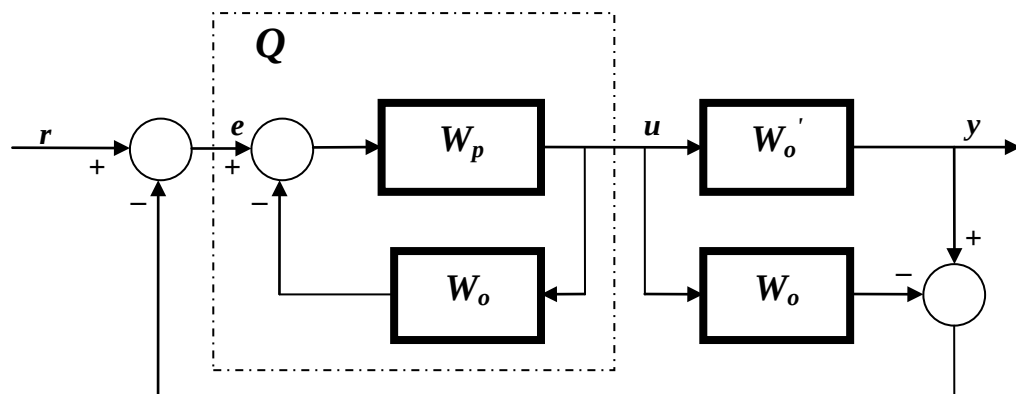


Рис. 3.4. Пояснення параметризації Юлли

Структуру, що міститься в пунктирному полі, позначимо як $Q(s)$. Нова конфігурація і є так звана структура з внутрішньою моделлю управління. $Q(s)$ називається регулятором *IMC*. Якщо $W_o(s)$ розглядається як еталонна модель, то така еталонна модель управління може бути вбудована в структуру регулятора.

Припустимо, що модель є точною, тобто $W_o(s) = W_o'(s)$. Рис. 3.4 показує, що стійкість замкнутої системи визначається тільки стійкістю $Q(s)$. Це основний висновок, який отримуємо з параметризації Юлли [42].

Більшість проблем синтезу може бути сформульована таким чином: дано об'єкт $W_o(s)$, синтезувати регулятор $W_p(s)$ таким чином, щоб замкнена система була внутрішньо стійкою і вихід $y(s)$ асимптотично наближався до завдання $r(s)$. Ця процедура значно ускладнюється, коли стійкість і якість розглядаються одночасно. З параметризацією Юлли, можна розглядати стійкість і якість окремо. Спочатку знайти всі стабілізуючі $W_p(s)$ з точки зору стійкості передавальної функції $Q(s)$. Потім шукати оптимальні $W_p(s)$ серед стійких регуляторів. Цей пошук набагато простіше.

Вплив регулятора $W_p(s)$ на функцію чутливості або додаткову функцію чутливості виявити складно. В той же час, $Q(s)$ має лінійний зв'язок з функціями чутливості, що може значно спростити постановку завдання для оптимальних регуляторів. Адже підставивши (3.5) в (3.1) і (3.2) маємо

$$S(s) = \frac{1}{1 + W_{op}(s)W_p(s)} = 1 - W_o(s)Q(s) \quad (3.7)$$

$$T(s) = \frac{W_o(s)W_p(s)}{1 + W_o(s)W_p(s)} = W_o(s)Q(s) \quad (3.8)$$

Очевидно, що $Q(s)$ повинна бути правильною, оскільки неправильна передавальна функція фізично не реалізовується. Тим не менш, було б зручно для представлення, тимчасово ослабити вимогу правильності синтезу регулятора.

У випадку, коли об'єкт без самовирівнювання, то для того, щоб знайти всі стабілізуючі регулятори, можна використати наступний спосіб. Написати $W_o(s)$ в формі:

$$W_o(s) = \frac{V(s)}{U(s)} \quad (3.9)$$

де $V(s)$ і $U(s)$ є стійкими, дійсними, правильними і раціональними. Існують дві стійкі, правильні, дійсні раціональні функції $X(s)$ і $Y(s)$, що задовольняють рівнянню

$$V(s)X(s) + U(s)Y(s) = 1 \quad (3.10)$$

Перепишемо (3.6), враховуючи (3.10) і те, що $W_p(s) = X(s) / Y(s)$ є стійким регулятором:

$$H(s) = \begin{bmatrix} V(s)X(s) & V(s)Y(s) \\ X(s)U(s) & -V(s)X(s) \end{bmatrix}$$

Відмітимо, що $V(s) \underbrace{[X(s) + U(s)Q(s)]}_{\text{стійкий}} + U(s) \underbrace{[Y(s) + V(s)Q(s)]}_{\text{стійкий}} = 1$ для будь-

якої стійкої $Q(s)$. Виявляється, що всі регулятори, з якими система зворотного зв'язку є внутрішньо стійкою можуть бути виражені як

$$W_p(s) = \frac{X(s) + U(s)Q(s)}{Y(s) - V(s)Q(s)} \quad (3.11)$$

де $Q(s)$ будь-яка стійка передавальна функція.

Легко переконатися, що все зводиться до попередньо розглянутого випадку, коли $W_o(s)$ є з самовирівнюванням. У цьому випадку,

$$V(s) = W_o(s), \quad U(s) = 1, \quad X(s) = 0, \quad Y(s) = 1$$

3.2. Вибір фільтра

При розробці процедури в синтезу регулятор $Q_{opt}(s)$ завжди доповнюється фільтром низьких частот $F(s)$: $Q(s) = Q_{opt}(s) F(s)$. Це пов'язано з прийнятими вище припущеннями, що оптимальний регулятор може бути неправильно визначеним. Фільтр має кілька функцій:

1) Оптимальний регулятор $Q_{opt}(s)$, як правило, є неправильно визначеним дробом. Тому однією з основних функцій фільтра є завдання зробити $Q_{opt}(s)$ правильним. При цьому, регулятор залишається оптимальним і після введення фільтра.

2) Так як $S(s) = 1 - W_o(s)Q(s)$ і $T(s) = W_o(s)Q(s)$, то параметри фільтра можуть бути використані для налаштування номінальної якості та стійкості, а також для кількісного компромісу між цими двома цілями.

3) Існує прямий зв'язок між параметром фільтра і змінними параметрами об'єкта, так $u(s) = Q(s)r(s)$. Якщо структуру управління не дозволяється змінювати, то можна обмежитися змінною величиною управління, регулюючи параметр фільтра. При цьому фільтр повинен задовольняти мінімальним наступним вимогам:

- замкнута система є внутрішньо стійкою;
- формула регулятора $Q(s) = Q_{opt}(s) F(s)$ є правильним дробом;
- досягається асимптотичне стеження уставки.

Першу умову легко виконати. Коли об'єкт є з самовирівнюванням, замкнена система внутрішньо стійка, поки $Q(s)$ є стійким.

Друга умова також може бути легко виконана. Як відомо, раціональна передавальна функція є неправильно визначеною, якщо степінь її чисельника більший, ніж степінь її знаменника. Щоб зробити її правильною, можна просто ввести фільтр, з степенем чисельника меншим, ніж степінь його знаменника у вигляді стійкої передавальної функції.

Тепер розглянемо третю умову. В якості основної вимоги по якості замкнутої системи управління, стеження помилки повинно зникнути асимптотично. Для асимптотичного стеження система m -го порядку має задовольняти

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 - W_o(s)Q_{opt}(s)F(s)}{s^k} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m-1 \quad (3.12)$$

або

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d^k}{ds^k} [1 - W_o(s)Q_{opt}(s)F(s)] = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m-1$$

Звичайна структура фільтра складається з однієї або декількох ланок першого порядку. Для спрощення задачі синтезу, бажано, щоб фільтр мав

якомога менше параметрів, в ідеалі – тільки один параметр. Як правило, фільтр з одним параметром виглядає наступним чином

$$F(s) = \frac{\beta_{m-1}s^{m-1} + \dots + \beta_1s + \beta_0}{(\lambda s + 1)^{n_j}}$$

де $\lambda \in$ часовою константою, параметр n_j повинен бути обраним таким, щоб зробити $Q(s) = Q_{opt}(s)F(s)$ правильно визначеним дробом. Власне для стійкої моделі m дорівнює числу полюсів, а β_i ($i = 0, 1, \dots, m-1$) вибрані так, щоб задовольнити вимогу асимптотичного стеження. Якщо модель є стійкою, то $m = 1$ для ступінчатого входу. Коли $\lim_{s \rightarrow 0} [1 - W_o(s)Q_{opt}(s)F(s)] = 0$, то $\beta_0 = 1$.

Порядок однопараметрового фільтра може бути обраний довільно. Однак, чим вище порядок, тим складніший регулятор. З цієї причини, порядок фільтра слід вибирати якомога нижчим. Він повинен бути обраним таким чином, щоб $Q(s)$ був правильним для строго правильного об'єкту, або степінь його знаменника був вищим на один, ніж степінь чисельника.

Один параметр фільтра забезпечує простий і наглядний спосіб описати різницю між оптимальною і субоптимальною системою. Існування сталої часу у фільтрі, яку можна регулювати прямо пов'язане із виходом замкненої системи. Краща якість може бути отримана за рахунок зменшення сталої. Коли невизначеність зростає, необхідно збільшити міру якості для одержання кращої надійності. Таким чином, може бути досягнутий розумний компроміс між двома конкуруючими цілями.

Так як $W_o(s)Q_{opt}(s) = 1$, то згідно з (3.12) фільтр 1-го типу виглядає наступним чином:

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^{n_j}} \quad (3.13)$$

Система з таким фільтром гарно справляється з вхідним ступінчатим збуренням. Для лінійно наростаючого збурення слід використовувати фільтр 2-го типу:

$$F(s) = \frac{n_j \lambda s + 1}{(\lambda s + 1)^{n_j}}$$

Коефіцієнт n_j обирається згідно нижченаведеної формули:

$$n_j = \begin{cases} \deg\{num(Q_{opt})\} - \deg\{denom(Q_{opt})\} & \deg\{num(Q_{opt})\} > \deg\{denom(Q_{opt})\} \\ 1, & \text{якщо } \deg\{num(Q_{opt})\} = \deg\{denom(Q_{opt})\} \end{cases}$$

3.3. Проектування H_∞ -ІМС-регулятор для об'єкта першого порядку з запізнюванням

Згідно параметризації регулятора [42] всі стійкі регулятори з внутрішньою моделлю управління можуть бути виражені як (3.5), де $Q(s)$ є стійкою передавальною функцією. Якщо модель є точною, передавальна функція з $d(s)$ до $y(s)$ подається як $S(s) = 1 - W_o(s)Q(s)$.

Візьмемо за критерій оптимальності H_∞ -норму, яка гарно описує реальні невизначеності [28] у вигляді

$$\min \|W_v(s)S(s)\|_\infty,$$

де $W_v(s)$ є деяка вагова функція.

Нехай на вхід подається стрибкоподібне збурення, яке є характерним для систем автоматичної стабілізації або для систем, у яких регульована величина повинна підтримуватись на заданому рівні, якою і є АСК температурними режимами котла. Тоді вагова функція може бути просто прийнята як $W_v(s) = 1/s$.

Основна ідея полягає в синтезі регулятора на основі наближеної моделі, а потім використання його для забезпечення потрібних показників якості функціонування (ПЯФ) системи з реальним об'єктом.

Розглянемо випадок, коли модель об'єкта описується у вигляді (2.5), при $\alpha = 0$. Тоді маємо таку передавальну функцію:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s} \quad (3.14)$$

За допомогою апроксимації Паде першого порядку (2.10) вона може бути записана як

$$W_o(s) \approx K_o \frac{1 - \tau/2 s}{(T_o s + 1)(1 + \tau/2 s)} \quad (3.15)$$

Розглянемо передавальну функцію від зовнішнього збурення до виходу системи. Для стійкості системи $W_v(s)S(s)$ повинна не мати полюсів в правій напівплощині. Отже маємо

$$\|W_v(s)S(s)\|_\infty = \|W_v(s)[1 - W_o(s)Q(s)]\|_\infty = \sup_{\text{Re } s > 0} |W_v(s)[1 - W_o(s)Q(s)]|$$

$W_o(s)$ має нуль при $s = 2/\tau$ у правій напівплощині, тобто $s = 2/\tau \in \mathbb{R}$ її внутрішньою точкою. Відповідно

$$\sup_{\text{Re } s > 0} |W_v(s)[1 - W_o(s)Q(s)]| \geq |W_v(s)[1 - W_o(s)Q(s)]|_{s=2/\tau} = \frac{\tau}{2} \quad (3.16)$$

Для вирішення цього рівняння, потрібно враховувати наступні обмеження:

1. Для того, щоб регулятор був фізично реалізованим, $Q(s)$ повинна бути правильно визначеною.
2. $Q(s)$ повинна бути внутрішньо стійкою.
3. Для того, щоб отримати кінцеву H_∞ -норму, а також для асимптотичної стійкості, $Q(s)$ повинна задовольняти умові:

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [1 - W_o(s)Q(s)] = 0$$

Одночасне врахування цих обмежень досить складне. Щоб отримати регулятор, який надає замкнутій системі заданих властивостей, слід, по-перше, ослабити вимоги правильності визначеності і знайти деяке оптимальне $Q_{opt}(s)$. Правильно визначена $Q(s)$ може бути отримана шляхом фільтрації $Q_{opt}(s)$ на високих частотах. З (3.16) маємо, що мінімум $\|W_v(s)S(s)\|_\infty \in \tau/2$. Це дає наступне єдине оптимальне рішення:

$$Q_{opt}(s) = \frac{W_v(s) - \tau/2}{W_v(s)W_o(s)} = \frac{(T_o s + 1)(1 + \tau/2 s)}{K_o} \quad (3.17)$$

$Q_{opt}(s)$ є неправильно визначеною, так як порядок чисельника більший за порядок знаменника, тому має бути введено фільтр нижніх частот. Виберемо наступний фільтр згідно (3.13):

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2}$$

де λ є додатнім дійсним числом. Фільтр не повинен порушувати обмеження асимптотичної стійкості:

$$\lim_{s \rightarrow 0} [1 - W_o(s)Q_{opt}(s)F(s)] = 0.$$

Тоді субоптимальна $Q(s)$, яка фізично реалізується має такий вигляд:

$$Q(s) = Q_{opt}(s)F(s) = \frac{(T_o s + 1)(1 + \frac{\tau}{2}s)}{K_o(\lambda s + 1)^2} \quad (3.18)$$

Тут λ є параметром, який тісно пов'язаний з критеріями якості. Невелике λ дає швидкий відгук, а збільшення λ уповільнює реакцію. Якщо $\lambda \rightarrow 0$, то $\|W_v(s)S(s)\|_\infty$ як правило, оптимальна. Таким чином, λ може бути використана як показник ефективності або міра якості. Тоді регулятор, описаний у (3.5) визначається як

$$W_p(s) = \frac{Q(s)}{1 - W_o(s)Q(s)} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_o s + 1)(1 + \frac{\tau}{2}s)}{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \frac{\tau}{2})s} \quad (3.19)$$

Отриманий регулятор володіє важливою особливістю, яка полягає в тому, що він компенсує обидва полюси наближеної моделі, або, що еквівалентно, два домінуючі полюси істинної моделі. Окрім того, в регуляторі існує лише один регульований параметр λ , який також є єдиною часовою константою номінальної передавальної функції замкненої системи. Цей параметр може бути використаний для процедури знаходження компромісу між якістю управління та робастною стійкістю замкненої системи. У (3.19) параметри регулятора можуть бути безпосередньо розраховані за допомогою параметрів об'єкта.

Для полегшення практичної реалізації структуру синтезованого регулятора можна привести до вигляду стандартного ПД-регулятора виду

$$W_p(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \quad (3.20)$$

тоді його параметри визначатимуться як

$$T_f = \frac{\lambda^2}{2\lambda + \tau/2}; \quad T_I = \tau/2 + T_o - T_f; \quad T_d = \frac{\tau T_o}{2T_i} - T_f; \quad k_p = \frac{T_i}{K_o(2\lambda + \tau/2)} \quad (3.21)$$

Таким чином, налаштування, отримані для H_∞ -ІМС-регулятора можна застосувати для будь-якої системи автоматичного регулювання, що має в собі ПІД-регулятор без зміни структури самої системи.

3.4. Розробка H_∞ -ІМС-регулятора для об'єкта другого порядку з запізнюванням

Об'єкт другого порядку з запізненням можна отримати з (2.5) при $0 < \alpha < 1$. Тоді маємо наступну передавальну функцію:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_2s + 1)(T_1s + 1)} \cdot e^{-\tau s} \quad (3.22)$$

За допомогою розкладання часу запізнення у ряд Тейлора (2.8) та обмежившись першим порядком, модель (3.22) може бути записана як

$$W_o(s) \approx \frac{K_o(1 - \tau s)}{(T_2s + 1)(T_1s + 1)} \quad (3.23)$$

Якщо на подано одиничне ступінчатє збурення, яке є характерним для об'єктів, що розглядаються, то вагова функція $W_v = 1/s$. Отже,

$$\|W_v S(s)\|_\infty = \|W_v [1 - W_o Q]\|_\infty = \sup_{\text{Re } s > 0} |W_v [1 - W_o Q]|$$

Оскільки (3.23) має нуль при $s = \frac{1}{\tau}$, що є внутрішньою точкою правої напівплощини, то

$$\sup_{\text{Re } s > 0} |W_v [1 - W_o Q]| \geq |W_v [1 - W_o Q]|_{s=\frac{1}{\tau}} = \tau \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) дає таке оптимальне рішення

$$Q_{opt} = \frac{W_v - \tau}{W_v W_o} = \frac{(T_2s + 1)(T_1s + 1)}{K_o} \quad (3.25)$$

Функція (3.25) є неправильно визначеною, тому вводимо фільтр виду $F = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2}$. Фільтр не повинен порушувати умови асимптотичної стійкості -

$\lim_{s \rightarrow 0} [1 - W_o Q_{opt} F] = 0$. Отже, правильно визначений регулятор є таким

$$Q = Q_{opt} F = \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{K_o (\lambda s + 1)^2} \quad (3.26)$$

$$W_p = \frac{Q}{1 - W_o Q} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \tau)s} \quad (3.27)$$

Із формул (3.19) і (3.27) видно, що регулятори мають лише один параметр налаштування – міру якості λ .

Отриманий регулятор зворотного зв'язку (3.9) може бути приведений до стандартного ПІД-регулятора виду (3.20). Тоді параметри ПІД-регулятора визначатимуться згідно наступних залежностей:

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{\lambda^2}{2\lambda + \tau} & T_I &= T_1 + T_2 - T_f \\ T_d &= \frac{T_1 T_2}{T_I} - T_f & k_r &= \frac{T_I}{K_o (2\lambda + \tau)} \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.5. Розробка H_∞ -ІМС-регулятора для об'єкта без самовирівнювання з запізнюванням

Розглянемо інтегральний об'єкт (без самовирівнювання) першого порядку, який описується передавальною функцією виду:

$$W_o = \frac{K_o}{s} e^{-\tau s} \quad (3.29)$$

Апроксимували ланку запізнення розкладанням в ряд Тає 1-го порядку маємо:

$$W_o = \frac{K_o \left(1 - s \frac{\tau}{2}\right)}{s \left(1 + s \frac{\tau}{2}\right)}$$

Внутрішня стійкість вимагає, щоб

$$\lim_{s \rightarrow 0} [1 - W_o(s) Q(s)] = 0$$

Щоб задовольнити цій умові, $Q(s)$, повинна напряду залежати від s , а вільний член залишку повинен бути $1/K_o$, тобто

$$Q(s) = \frac{s[1 + sQ_1(s)]}{K_o} \quad (3.30)$$

де $Q_1(s)$ є стійкою передавальною функцією. Припустимо, що на вхід подається ступінчате збурення. Таким чином, вагова функція визначається як $W_v(s) = 1/s$. Наближена модель об'єкта має нуль у правій напівплощині при $2/\tau$. Отже, маємо

$$\|W_v(s)S(s)\|_\infty = \|W_v(s)[1 - W_o(s)Q(s)]\|_\infty \geq |W_v(2/\tau)|$$

Мінімізуючи ліву сторону нерівності отримаємо

$$\min \left\| W_v(s) \left\{ 1 - W_o(s) \frac{s[1 + sQ_1(s)]}{K_o} \right\} \right\|_\infty = \frac{\tau}{2}$$

Тоді оптимальний регулятор $Q_{opt}(s) = \tau/2$. Підставляння цього виразу в (3.30) дає

$$Q_{opt}(s) = \frac{s}{K_o} \left(1 + \frac{\tau}{2} s \right) \quad (3.31)$$

Як і для об'єктів з самовирівнюванням, необхідно ввести фільтр $F(s)$ для фізичної реалізації $Q_{opt}(s)$. Таким чином, остаточний регулятор $Q(s)$ визначатиметься як: $Q(s) = Q_{opt}(s) F(s)$. Для асимптотичної стеження, система повинна задовольняти наступній умові (3.12) або, що еквівалентно:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} [1 - W_o(s)Q(s)] = 0 \quad (3.32)$$

Щоб досягти цього, фільтр повинен мати більш складну форму, ніж в системі з об'єктом з самовирівнюванням [40]. Він повинен мати нуль:

$$F(s) = \frac{\beta s + 1}{(\lambda s + 1)^n}$$

де λ є міра якості, n повинно бути достатньо великим, щоб $Q(s)$ була правильно визначеною, а β – додатне дійсне число, яке вибирається, щоб задовольнити (3.32). Очевидно, що вимогу асимптотичної стеження може

задовольнити фільтр третього порядку. Оберемо такий фільтр наступної структури:

$$F(s) = \frac{(3\lambda + \tau/2)s + 1}{(\lambda s + 1)^3} \quad (3.33)$$

Відповідно, субоптимальний регулятор матиме вигляд

$$Q(s) = \frac{s(1 + s\tau/2)[(3\lambda + \tau/2)s + 1]}{K_o(\lambda s + 1)^3} \quad (3.34)$$

Тоді регулятор внутрішнього зв'язку отримуємо як

$$\begin{aligned} W_r(s) &= \frac{Q(s)}{1 - W_o(s)Q(s)} = \frac{1}{K_o} \frac{s(1 + s\tau/2)[(3\lambda + \tau/2)s + 1]}{(\lambda s + 1)^3 - (1 - s\tau/2)[(3\lambda + \tau/2)s + 1]} = \\ &= \frac{1}{K_o} \frac{(3\lambda\tau/2 + \tau^2/4)s^2 + (3\lambda + \tau)s + 1}{\lambda^3 s^2 + (3\lambda^2 + 3\lambda\tau/2 + \tau^2/4)s} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Таку структуру шляхом еквівалентних перетворень можна звести до ПІД-регулятора (3.20), параметри якого визначатимуться за формулами

$$\begin{aligned} k_r &= \frac{1}{K_o} \frac{3\lambda + \tau}{3\lambda^2 + 3\lambda\tau/2 + \tau^2/4} & T_i &= 3\lambda + \tau \\ T_d &= \frac{3\lambda\tau/2 + \tau^2/4}{3\lambda + \tau} & T_f &= \frac{\lambda^3}{3\lambda^2 + 3\lambda\tau/2 + \tau^2/4} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Головною особливістю регулятора такого типу для об'єктів з самовирівнюванням є те, що вони можуть бути налаштовані для кількісних показників і надійності. Ця властивість залишається і для систем з інтегровальними об'єктами. Залежності між мірою якості і основними показниками якості системи також можуть бути однозначно виведені.

3.6. Синтез робастної системи з регулятором з внутрішньою моделлю з двома ступенями свободи

Розглянута вище система автоматичного керування з H_∞ -ІМС-регулятором представляє собою систему з одним ступенем свободи, тобто одним регулятором забезпечується потрібна якість роботи системи за різними каналами: завданням і зовнішнім збуренням. При цьому досягти оптимальних результатів за обома каналами одночасно досить проблематично. В цьому

випадку налаштовують регулятор на канал, що вважають більш важливим та актуальним. У випадку, якщо потрібно забезпечити високу якість за обома каналами розбивають регулятор на дві частини, одна з яких відповідає за забезпечення робастності і послаблення впливу шумів та зовнішніх збурень, а друга частина – забезпечує задану реакцію на керуючий вплив. Регулятор, що надає можливість незалежного вирішення цих двох задач називають "регулятором з двома ступенями свободи", а на його умовному зображенні присутні два входи (Рис. 3.5).

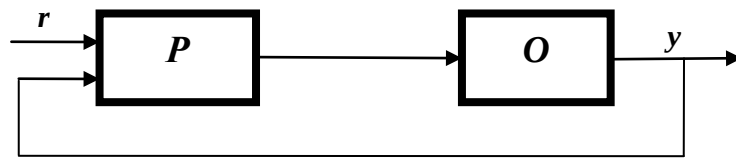


Рис. 3.5. Регулятор з двома ступенями свободи

Представимо базову структура системи автоматичного керування із регулятором з внутрішньою моделлю і двома ступенями свободи (Рис. 3.6).

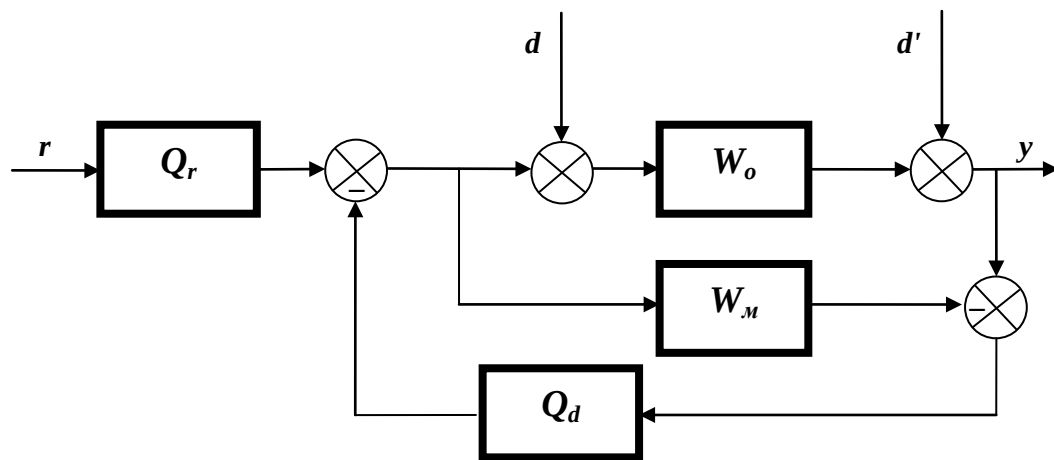


Рис. 3.6. Базова структура АСК з ІМС-регулятором з двома ступенями свободи

На цій схемі використані такі позначення:

W_o – передавальна функція об'єкта керування, параметри якого можуть змінюватися; W_m – передавальна функція моделі об'єкта керування, яка залишається сталою; Q_r – регулятор відпрацювання завдання; Q_d – регулятор компенсації збурень; r – сигнал завдання; d і d' – зовнішні збурення на вході і виході об'єкта; y – вихідний сигнал системи автоматичного керування.

Як видно із Рис. 3.6 така АСК має 3 вхідні сигнали: сигнал завдання, збурення з боку регульовального органу та зовнішнє збурення, і один вихідний сигнал.

За допомогою еквівалентних перетворень структуру на Рис. 3.6 можна привести до класичного вигляду системи автоматичного керування з двома ступенями свободи Рис. 3.7.

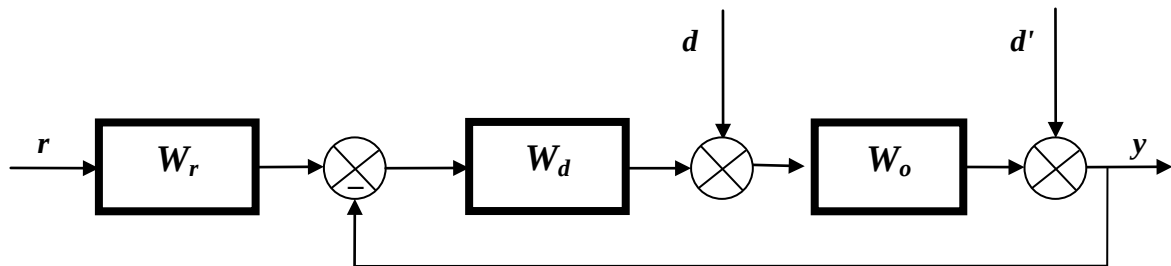


Рис. 3.7. Класична система з регулятором із двома ступенями свободи

Згідно з Рис. 3.6 отримаємо передавальні функції, які описуються зв'язок між вихідними та вхідним сигналом:

$$W_{ry} = \frac{Q_r}{Q_d} \cdot \frac{\frac{Q_d}{1 - W_m Q_d} \cdot W_o}{1 + \frac{Q_d}{1 - W_m Q_d} \cdot W_o} = \frac{Q_r}{1 + Q_d (W_o - W_m)} \quad (3.37)$$

$$W_{dy} = \frac{W_o}{1 + \frac{Q_d}{1 - W_m Q_d} \cdot W_o} = \frac{W_o (1 - W_m Q_d)}{1 + Q_d (W_o - W_m)} \quad (3.38)$$

$$W_{d'y} = \frac{1}{1 + \frac{Q_d}{1 - W_m Q_d} \cdot W_o} = \frac{1 - W_m Q_d}{1 + Q_d (W_o - W_m)} \quad (3.39)$$

Використовуючи поняття функцій чутливості, запишемо зв'язок між вхідними сигналами та вихідним:

$$y = \frac{Q_r}{Q_d} \cdot T \cdot R + W_o \cdot S \cdot d + S \cdot d' \quad (3.40)$$

де

$$S = W_{dy} = \frac{1 - W_m Q_d}{1 + Q_d (W_o - W_m)} \quad (3.41)$$

$$T = 1 - S = \frac{W_m Q_d}{1 + Q_d (W_o - W_m)} \quad (3.42)$$

Для отримання структури передавальних функцій регуляторів W_r та W_d скористаємось отриманими раніше структурами H_∞ -ІМС-регуляторів для системи з одним ступенем свободи.

Так для об'єкта першого порядку з запізненням маємо Q_r у вигляді (3.18). Тоді структури H_∞ -ІМС-регуляторів, зображених на Рис. 3.7, можна представити як:

$$W_r = \frac{Q_r}{Q_d} = \frac{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)}{k_o (\lambda_r s + 1)^2} \cdot \frac{k_o (\lambda_d s + 1)^2}{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)} = \frac{(\lambda_d s + 1)^2}{(\lambda_r s + 1)^2} \quad (3.43)$$

$$W_d = \frac{Q_d}{1 - Q_d W_o} = \frac{1}{k_o} \cdot \frac{(T_o s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)}{\lambda_d^2 s^2 + \left(2\lambda_d + \frac{\tau}{2}\right) s} \quad (3.44)$$

Якщо об'єкт описується другим порядком з запізненням, то згідно (3.26) структури H_∞ -ІМС-регуляторів, зображених на Рис. 3.7, матимуть вигляд:

$$W_r = \frac{Q_r}{Q_d} = \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{K_o (\lambda_r s + 1)^2} \cdot \frac{K_o (\lambda_d s + 1)^2}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} = \frac{(\lambda_d s + 1)^2}{(\lambda_r s + 1)^2} \quad (3.45)$$

$$W_d = \frac{Q_d}{1 - Q_d W} = \frac{\frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{K_o (\lambda_d s + 1)^2}}{1 - \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{K_o (\lambda_d s + 1)^2} \cdot \frac{K_o (1 - \tau s)}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{s^2 \lambda^2 + s(2\lambda + \tau)} \quad (3.46)$$

Процедура налаштування параметрів таких регуляторів пропонується наступна: спочатку налаштовується регулятор компенсації збурень на оптимальний перехідний процес за каналом збурення-вихід, а потім при обраному значенні сталої часу регулятора компенсації збурень, буде обиратися міра якості регулятора відпрацювання завдання на отримання оптимального перехідного процесу за каналом завдання-вихід.

3.7. Робастність і кількісні показники якості

Параметр λ є мірою якості в H_∞ -ІМС-регуляторі і має пряме відношення до робастності замкнутої системи. Змінюючи цей параметр можна отримувати

різні кількісні показники якості функціонування системи та робастності.

Якщо модель об'єкту описується як (3.14), передавальна функція замкнутої системи по каналу завдання буде

$$W_{ry}(s) = T(s) = \frac{1 - \tau/2 s}{(\lambda s + 1)^2}$$

а по каналу зовнішніх збурень буде

$$W_{dy}(s) = S(s) = \frac{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \tau/2)s}{(\lambda s + 1)^2}$$

Це дозволяє легко обрати як видно з (3.16) при $\lambda \rightarrow 0$ система наближається до оптимальної при $\|W_v(s)S(s)\|_\infty \rightarrow \tau/2$.

Застосування регулятора, отриманого за допомогою розкладання Паде, на реальному об'єкті призводить до появи коливальних змін в характері функцій чутливості $S(j\omega)$ і $T(j\omega)$ на частотах, які близькі до частоти зрізу (в верхній частині частотного діапазону замкненої системи), що пов'язано з похибками використання апроксимації. Природно використати цю похибку як оцінку невизначеності і нехай

$$|\Delta_m(j\omega)| \geq K_o \left| \frac{\exp(-\tau j\omega)}{T_o j\omega + 1} - \frac{1 - \tau/2 j\omega}{(T_o j\omega + 1)(1 + \tau/2 j\omega)} \right|$$

Робастна стійкість замкнутої системи може бути визначена

$$\|\Delta_m(s)T(s)\|_\infty < 1 \quad (3.47)$$

Збільшення λ призводить до:

- зменшення $|T(j\omega)|$ на високих частотах, тобто до покращення робастності;
- збільшення $|S(j\omega)|$ на низьких частотах;
- звуження частотного діапазону системи, а отже, як наслідок, погіршуються показники якості функціонування (ПЯФ), передусім – швидкодія.

Зменшення λ , навпаки, впливає на ріст $|T(j\omega)|$ на високих частотах і зниження $|S(j\omega)|$ на низьких частотах, що покращує ПЯФ, але погіршує

робастність. Отже, використовуючи монотонний характер впливу, можна знайти компроміс між бажаними значенням ПЯФ та робастністю.

Наближена модель не зовсім точно описує оригінальний об'єкт, тому існує можливість того, що регулятор, який стабілізує наближену модель, не зможе стабілізувати реальний об'єкт. Використання міри якості може вирішити цю проблему. Для цього наближена модель розглядається як реальний об'єкт, а помилка апроксимації вважається невизначеністю. Наявність похибки наближення встановлює нижню межу $\lambda_{\text{гр}}$. Поки міра якості більша, ніж нижня межа, замкнута система стійка. Експериментальні дослідження дають значення $\lambda_{\text{min}}=0,1\tau$ і $\lambda_{\text{max}}=1,20\tau$.

Розглянемо кількісні проблеми налаштування на необхідні ПЯФ та робастність. Спочатку проектні вимоги до показників робастності сформулюємо до номінального об'єкту керування, коли Δ_m залежить тільки від помилки апроксимації. Тоді вплив на ПЯФ можна отримати за допомогою методів моделювання.

На Рис. 3.8 – Рис. 3.17 представлені залежності основних прямих показників якості від параметра λ , який забезпечує оцінку якості. Видно, що перерегулювання σ , ступінь згасання ψ , час підйому t_n і час регулювання T_p та інші показники якості однозначно залежать від λ . Наприклад, можна визначити залежність між запасом по модулю чи по фазі і величиною λ/τ . Динамічний викид зручно оцінювати у відношенні до коефіцієнту передачі об'єкта K_o і він в свою чергу залежить від співвідношення T_o . Крім того, є однозначний зв'язок між λ/τ та інтегральним показником якості.

За допомогою цих кривих можна проектувати H_∞ -ІМС-регулятор для кількісної номінальної якості. Наприклад, якщо допустиме максимальне перерегулювання становить 10%, то можна згідно з Рис. 3.11 просто взяти $\lambda = 0,43\tau$.

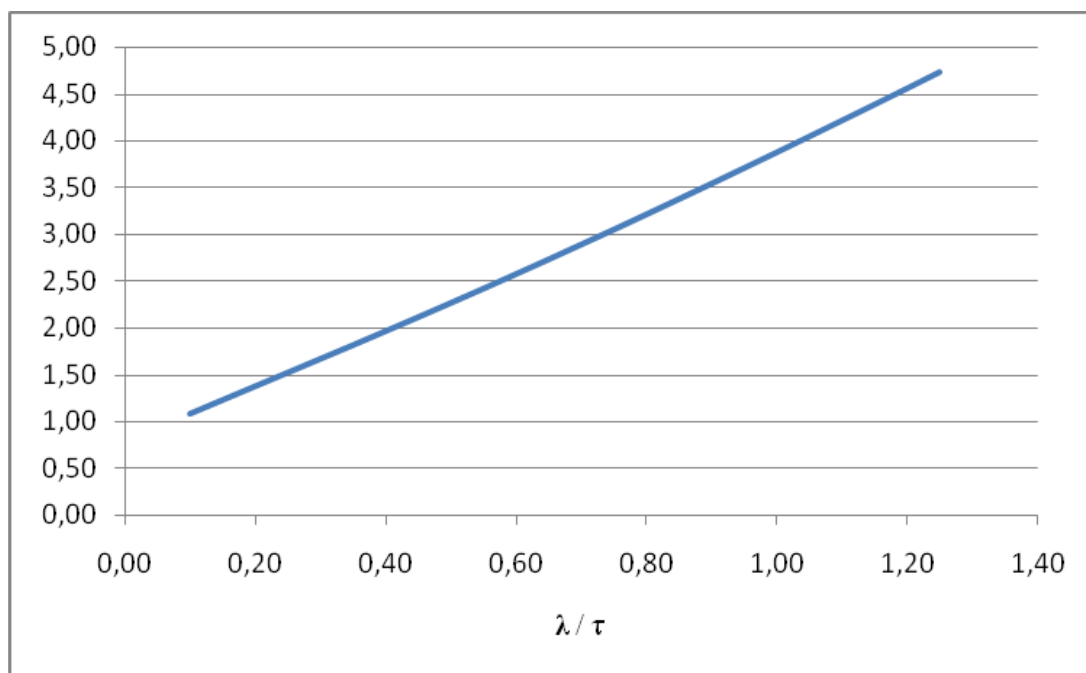
Вибираючи основні ПЯФ, що визначає λ , ми відразу можемо оцінити інші прямі ПЯФ і, за потреби, скоригувати вибір.

Тепер припустимо, що кількісні параметри синтезу дані для невизначеної системи. У цьому випадку існує додаткова невизначеність на похибку наближення. Якщо сукупність невизначеностей відома, точна міра якості може бути розрахована за необхідною і достатньою умовою для робастної роботи. На жаль, з технічних або економічних причин структура невизначеностей не завжди точно відома. І навіть якщо вона відома, аналітичний розрахунок потрібних налаштувань досить складний. Тому доцільно використовувати ітераційну процедуру синтезу. Наприклад, щоб замкнута система мала певне значення якогось показника якості при всіх невизначеностях об'єкта, слід дотримуватися такої процедури налаштування:

- 1) розробка регулятора для номінального об'єкта з заданим показником якості;
- 2) заміна номінального об'єкта на об'єкт з найгіршим поєднанням параметрів (тобто, коефіцієнту передачі об'єкта і часу запізнювання надається їх максимальне значення);
- 3) встановлення такої міри якості, для якої показник якості функціонування системи приймає гранично-допустиме значення.

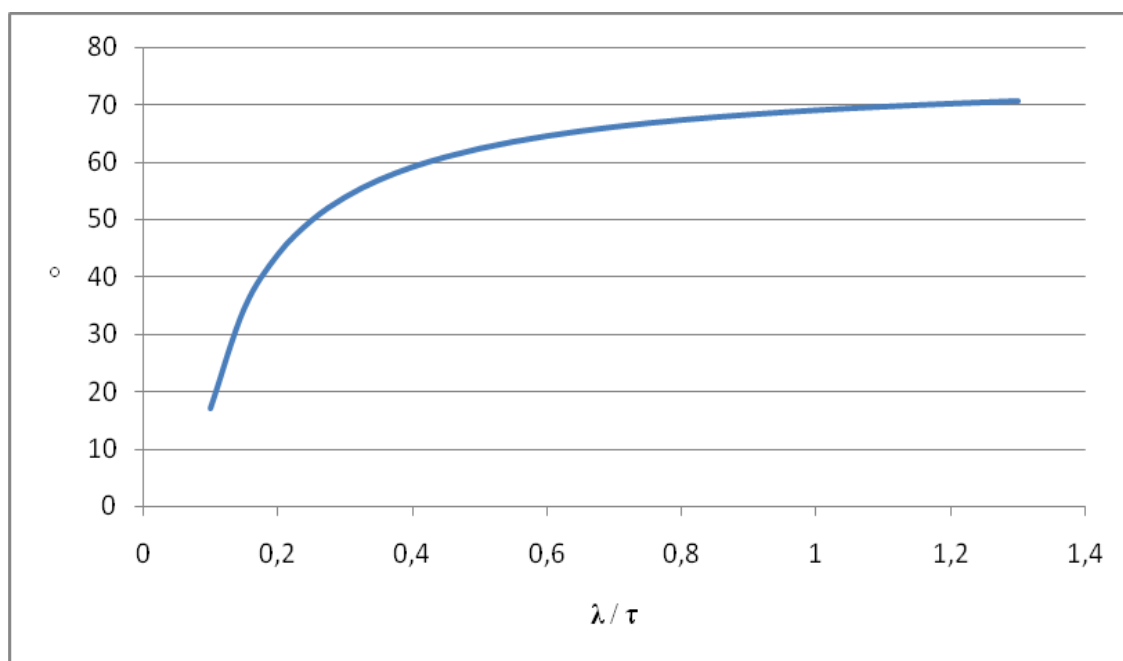
Отже, спроектувавши робастний регулятор (3.19) або (3.27), за допомогою процедури зміни λ ми можемо досягти потрібної якості за прямим ПЯФ.

Нижче представлені залежності для об'єкта першого порядку між приведеними показниками якості перехідного процесу та налаштуваннями регулятора в аналітичному та графічному вигляді.



$$m = 0,8 \cdot \frac{\lambda}{\tau} + 0,7$$

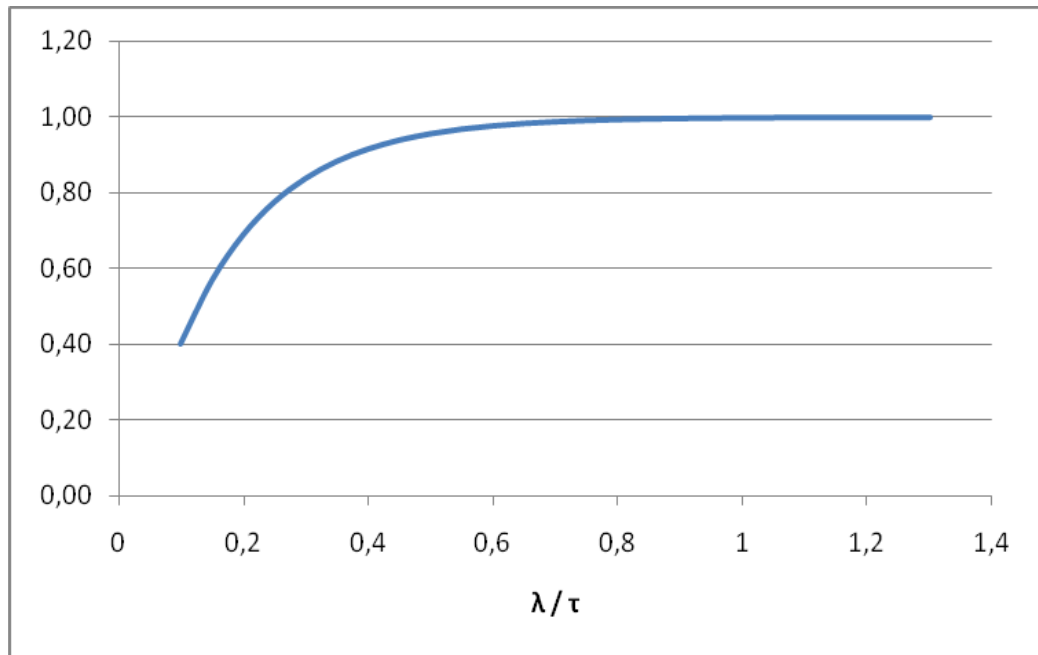
Рис. 3.8. Залежність запасу стійкості по модулю від сталої часу регулятора



$$\beta = 75 - \frac{6}{\lambda / \tau}$$

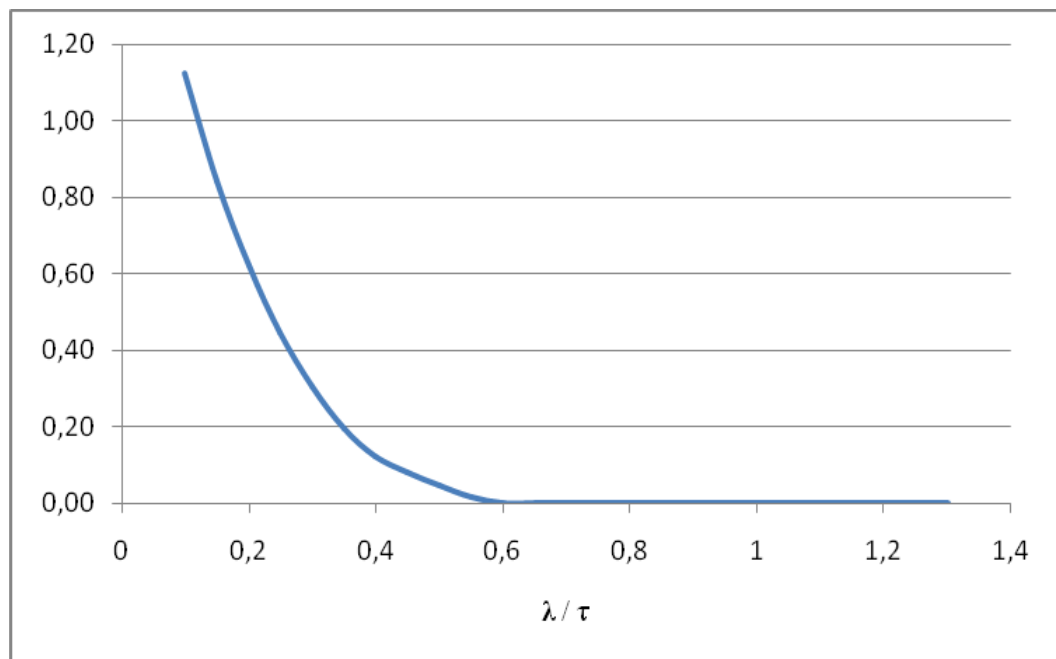
Рис. 3.9. Залежність запасу стійкості по фазі від сталої часу регулятора

Канал завдання-вихід



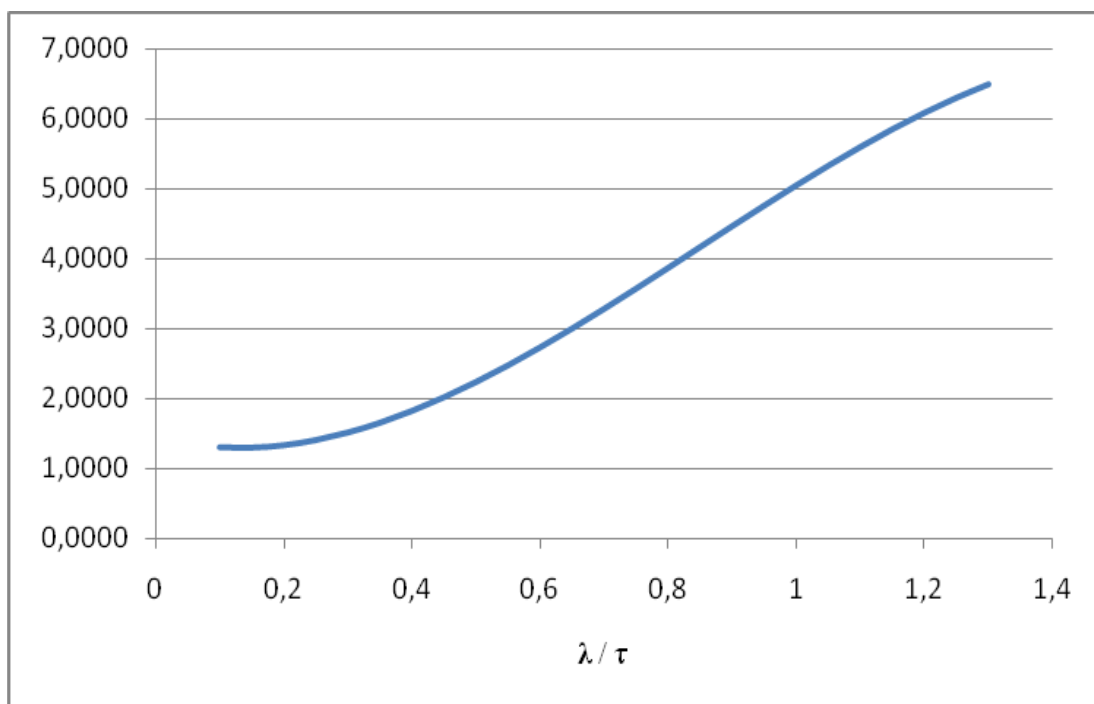
$$\psi = 1 - 0.6 \cdot e^{-6.55 \left(\frac{\lambda}{\tau} - 0.1 \right)}$$

Рис. 3.10. Залежність ступеня затухання від сталої часу регулятора



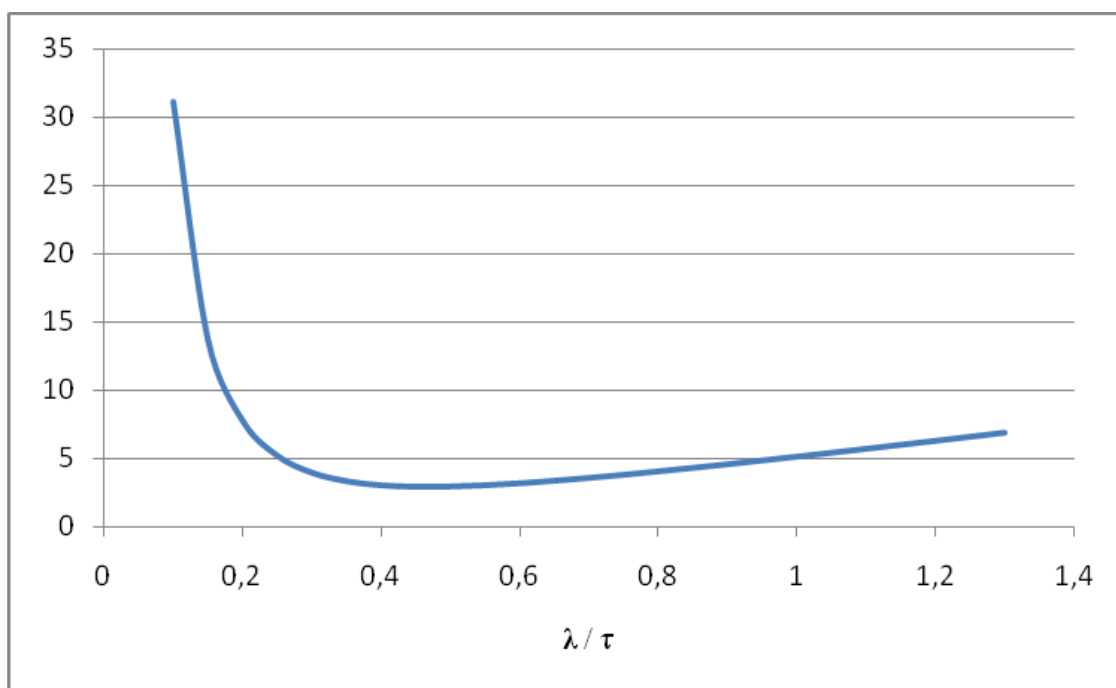
$$\sigma = e^{0.77 - 5.3 \frac{\lambda}{\tau}} - 0.12$$

Рис. 3.11. Залежність перерегулювання від сталої часу регулятора



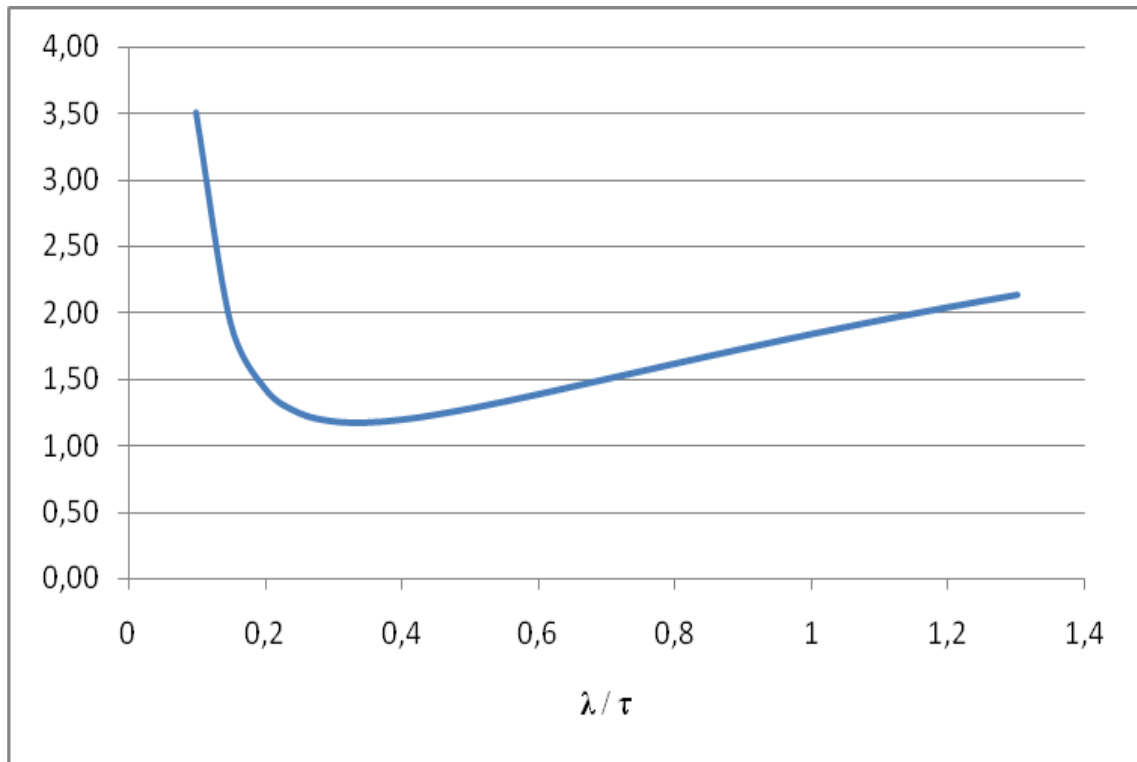
$$\frac{t_{ni0}}{\tau} = -3.9 \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^3 + 9.9 \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2 - 2.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau}\right) + 1.45$$

Рис. 3.12. Залежність часу підйому від сталої часу регулятора



$$\frac{t_{reg}}{\tau} = -1.5 + 6.3 \cdot \frac{\lambda}{\tau} + \frac{0.32}{\left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2}$$

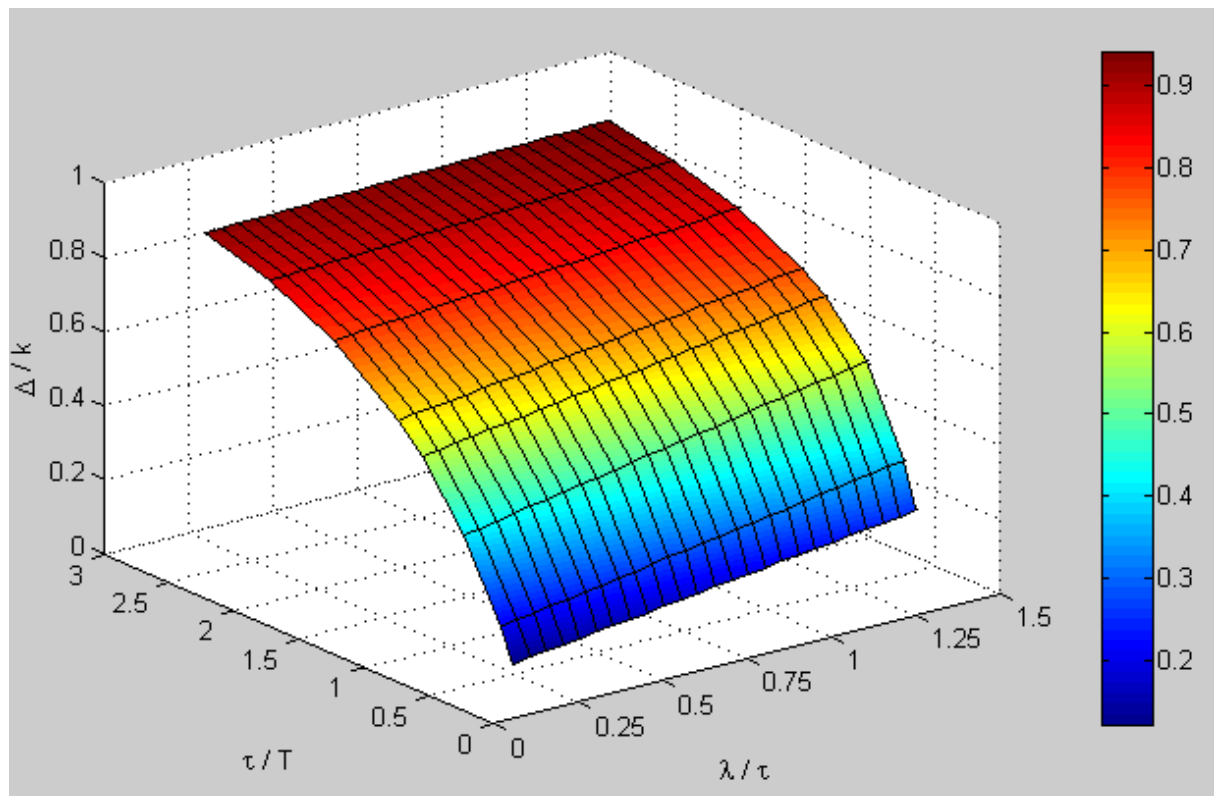
Рис. 3.13. Залежність часу регулювання від сталої часу регулятора



$$\frac{ISE}{\tau} = 0.33 + 1.83 \cdot \frac{\lambda}{\tau} - 0.35 \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau} \right)^2 + \frac{0.03}{\left(\frac{\lambda}{\tau} \right)^2}$$

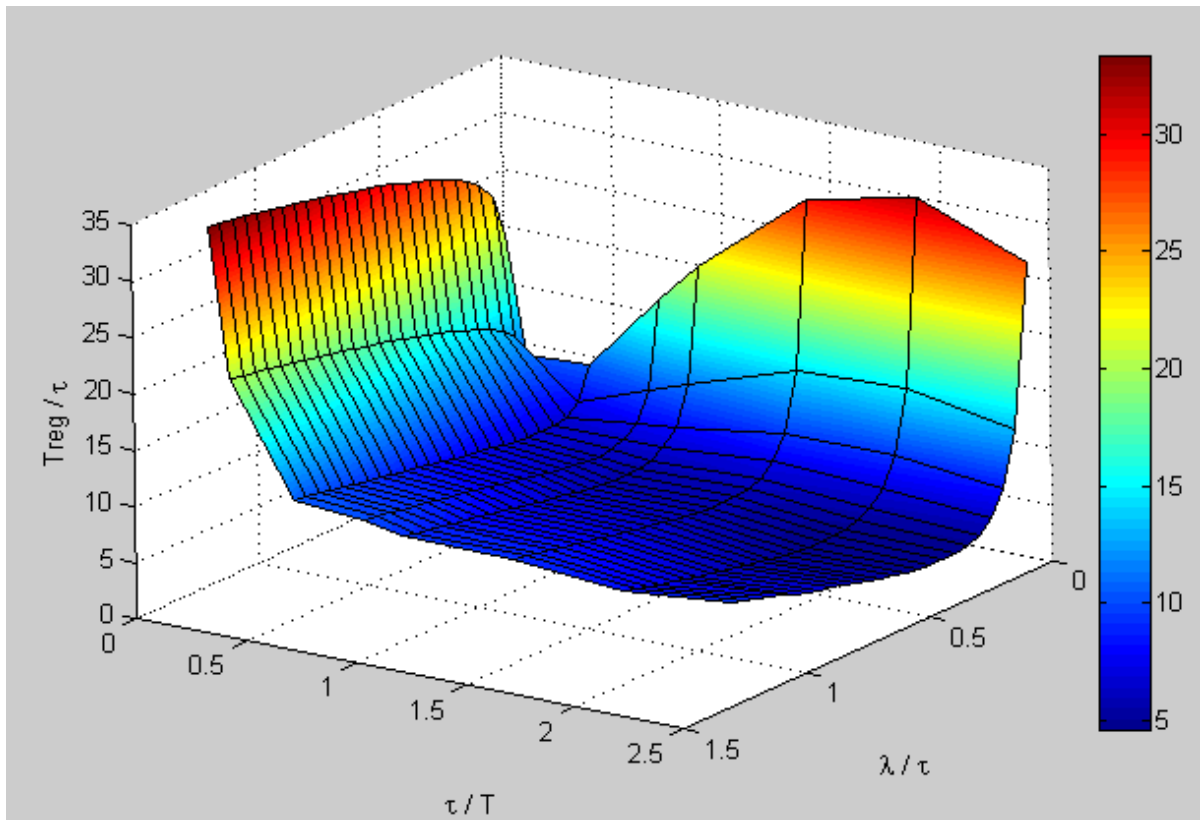
Рис. 3.14. Залежність інтегрального квадратичного критерію від сталої часу регулятора

Канал збурення-вихід



$$\frac{\Delta}{k_{oo}} = \left(0.42 \cdot e^{-1.25 \frac{\tau}{T}} - 0.38 \cdot e^{-3.5 \frac{\tau}{T}} \right) \cdot \frac{\lambda}{\tau} + \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right)$$

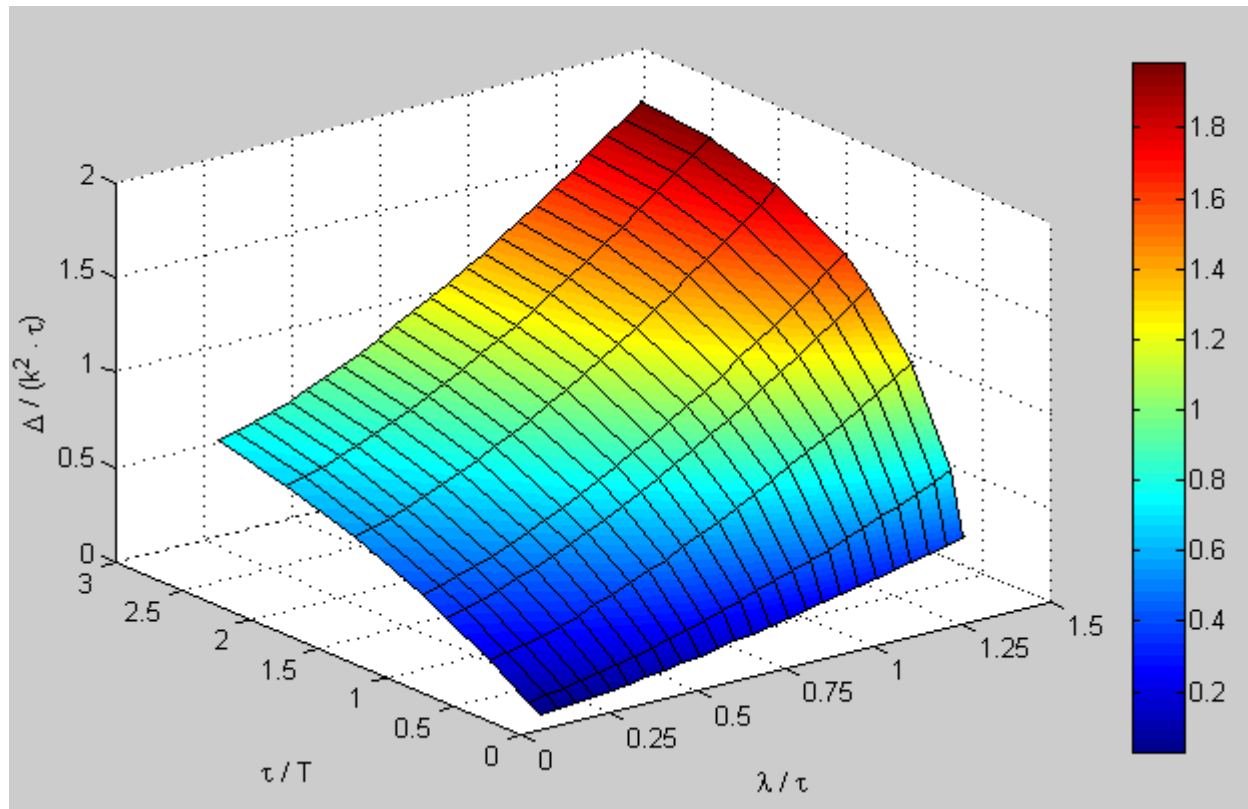
Рис. 3.15. Залежність динамічної похибка від сталої часу регулятора



$$\frac{t_{pez}}{\tau} = \frac{2}{\left(\frac{\tau}{T}\right)^{1.2}} + \left(1.5 \cdot \sin\left(9 \cdot \frac{\tau}{T}\right) + 6.3\right) \cdot \frac{\lambda}{\tau} +$$

$$+ \left(-0.7 \cdot \sin\left(9 \cdot \frac{\tau}{T}\right) + 0.1 \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)^{2.8} - 0.9\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2 + \frac{0.4 \cdot \sin\left(0.8 \cdot \frac{\tau}{T}\right) - 0.1}{\left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2}$$

Рис. 3.16. Залежність часу регулювання від сталої часу регулятора



$$\frac{ISE}{k_{oo}^2 \cdot \tau} = \left(1 - 1.1 \cdot e^{-0.55 \cdot \frac{\tau}{T}} + 0.1 \cdot e^{-5.5 \cdot \frac{\tau}{T}} \right) + \left(-6.9 - 0.25 \cdot \frac{\tau}{T} + 8 \cdot \left(\frac{\tau}{T} \right)^{0.05} \right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau} \right)^{1.5}$$

Рис. 3.17. Залежність інтегрально-квадратичного критерію від сталої часу регулятора

Залежності основних показників якості функціонування системи можна наводити в графічному або аналітичному вигляді, що представлено для об'єкта 1-го порядку вище. Проте, для об'єктів вищого порядку ці залежності значно ускладнюються внаслідок наявності більшої кількості параметрів об'єкта, які до всього ще мають взаємний зв'язок. Так, наприклад, на кінцевий показник якості буде впливати не тільки коефіцієнт підсилення об'єкта, а ще й відношення запізнення до сталої часу. Відображення всіх цих зв'язків в аналітичному, а тим більше в графічному вигляді, є досить проблематичною задачею, результатами якої користуватись буде складно і незручно. Значно простіше, в даному випадку, використовувати табличні дані з деяким програмним керуванням, що полегшує пошук потрібних результатів в масиві даних.

В результаті проведеного моделювання були розглянуті системи з об'єктами 1-го та 2-го порядків та H_∞ -ІМС-регуляторами з одним та двома ступенями свободи.

Під час збору даних було виявлено, що питомі значення показників якості, тобто приведені до параметрів об'єкта, залежать від керованості об'єкта (відношення τ/T) об'єкта керування та міри якості регулятора (параметр λ/τ). Для визначення питомого значення показника якості використовуються такі залежності:

– канал завдання-вихід:

- час підйому $-\frac{t_r}{\tau}$;
- час регулювання $-\frac{t_s}{\tau}$;
- інтегральний квадратичний критерій $-\frac{ISE}{\tau}$;
- інтегральний часовий квадратичний критерій $-\frac{ITSE}{\tau^2}$;
- інтегральний часовий абсолютний критерій $-\frac{ITAE}{\tau^2}$;

– канал збурення-вихід:

- динамічна похибка $-\frac{\Delta}{k}$;
- час регулювання $-\frac{t_s}{\tau}$;
- інтегральний квадратичний критерій $-\frac{ISE}{k^2 \cdot \tau}$;
- інтегральний часовий квадратичний критерій $-\frac{ITSE}{k^2 \cdot \tau^2}$;
- інтегральний часовий абсолютний критерій $-\frac{ITAE}{k \cdot \tau^2}$.

На основі отриманих залежностей був зібраний масив даних та створена СУБД, яка дозволяє підібрати такі параметри налаштувань регулятора, що задовольняють заданим параметрам об'єкта та введеним показникам якості

функціонування. Причому, одразу можна задавати не один вихідний показник якості, а цілий набір.

Зовнішній вигляд вікна інтерфейсу пошуку параметрів представлено на Рис. 3.18.

The screenshot shows a software window titled "Показники перехідного процесу" (Transient Process Indicators). It includes a "Minimize" button in the top left. The main area is divided into several sections:

- Ступені свободи** (Degrees of Freedom): Radio buttons for 1 and 2, with 2 selected.
- Параметри об'єкта** (Object Parameters): Input fields for Kob (2), T1 (1500), T2 (80), and tau (15).
- Запаси стійкості** (Stability Reserves): Checkboxes and input fields for Ms (checked, 1.6), Gm, and Pm.
- Завдання-вихід** (Output Task): Checkboxes and input fields for ϕ , δ , Tпід, Tрег, ISE, ITSE, ITAE, and a blank field.
- Збурення-вихід** (Disturbance Output): Checkboxes and input fields for ϕ , δ , D (checked, 0.36), Tрег, ISE, ITSE, ITAE, and a blank field.

At the bottom, there are two buttons: "Налаштувати" (Configure) and "На головну" (Back to Main).

Рис. 3.18. Інтерфейс підбору параметрів регулятора

Після введення параметрів об'єкта та задання необхідних показників якості функціонування системи, отримуємо налаштування регулятора, які задовольняють вказаним вимогам, а також значення інших показників якості.

Таким чином, за допомогою на основі отриманих залежностей можна налаштовувати H_∞ -ІМС-регулятор на наперед задані вимоги до перехідного процесу та запасів стійкості.

3.8. Визначення меж робастності

Автоматична система керування не може бути абсолютно робастною. Можемо говорити лише про її робастність на певному інтервалі невизначеностей, наприклад, діапазоні зміни параметрів моделі об'єкта. Окрім того, робастність визначається за певним, наперед визначеним показником (або показниками) якості функціонування, який не повинен виходити за жорсткі

обмеження. Одним з способів визначення робастності АСК є використання відносного показника чутливості, який обчислюється за наступною формулою:

$$\delta = \frac{\frac{|X - X_{opt}|}{X_{opt}}}{\frac{|Y - Y_{opt}|}{Y_{opt}}}, \quad (3.48)$$

де X_{opt} – значення обраного показника якості в номінальному режимі,

X – значення показника якості при невизначеностях (наприклад, при зміні параметра об'єкта),

Y_{opt} – оптимальне значення параметра об'єкта,

Y – змінене значення параметра об'єкта.

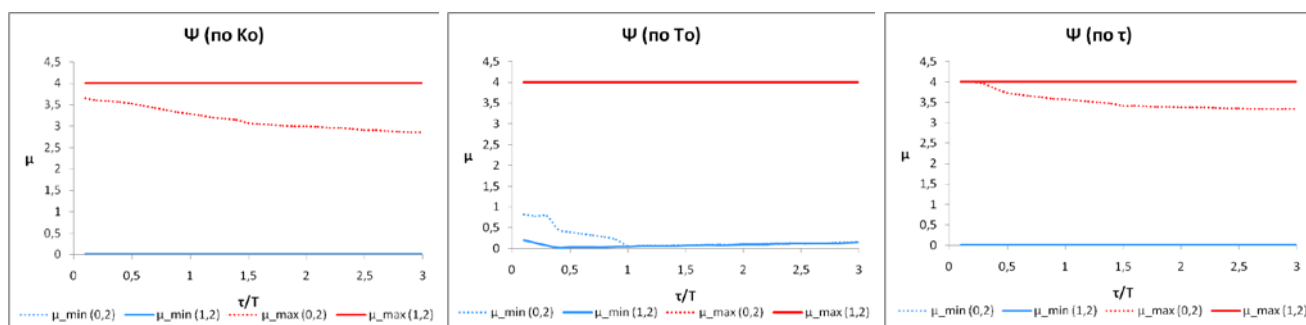
Система вважається робастною, тобто зберігає заданий запас стійкості при варіації параметрів, якщо відносний коефіцієнт чутливості (3.48) не перевищує значення одиниці [4].

Використовуючи об'єкт першого порядку з запізненням були проведені дослідження для таких основних показників якості функціонування системи як перерегулювання ψ , ступінь з атухання σ , час регулювання $t_{рег}$, інтегрально-квадратичний критерій ISE , інтегрально-квадратичний зважений критерій $ITSE$, інтегрально-модульний зважений критерій $ITAE$, максимум функції чутливості M_s .

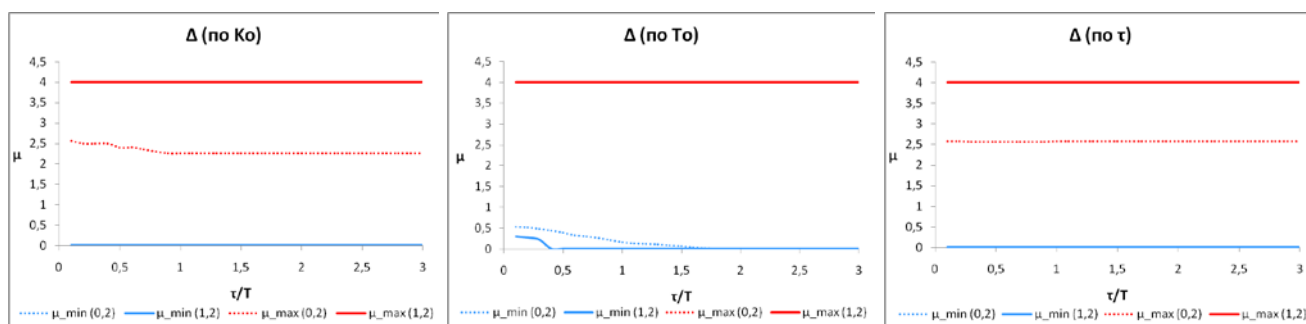
Дослідження проводились наступним чином: обраний параметр об'єкта P змінювався за формулою $P = \mu * P$, $\mu = (0,4)$. Після чого для різних мір якості визначалися граничні коефіцієнти μ_{min} (у бік зменшення параметру) та μ_{max} (у бік збільшення параметру), при яких система залишалась робастною за визначеним показником якості функціонування.

В результаті отримані допустимі межі змін параметрів об'єктів (K_o , T_o і τ_o) при яких система з $IMC-H_\infty$ -регулятором залишається робастною за визначеним показником якості. При цьому на остаточні результати впливають як міра якості регулятора λ , так і ступінь складності керування об'єктом – відношення

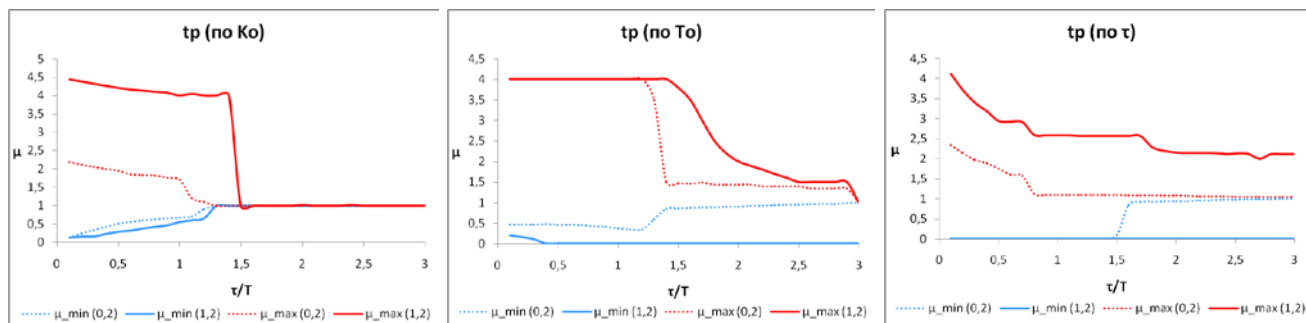
τ/T . Основні результати, отримані при моделюванні таких систем наведені на Рис. 3.19.



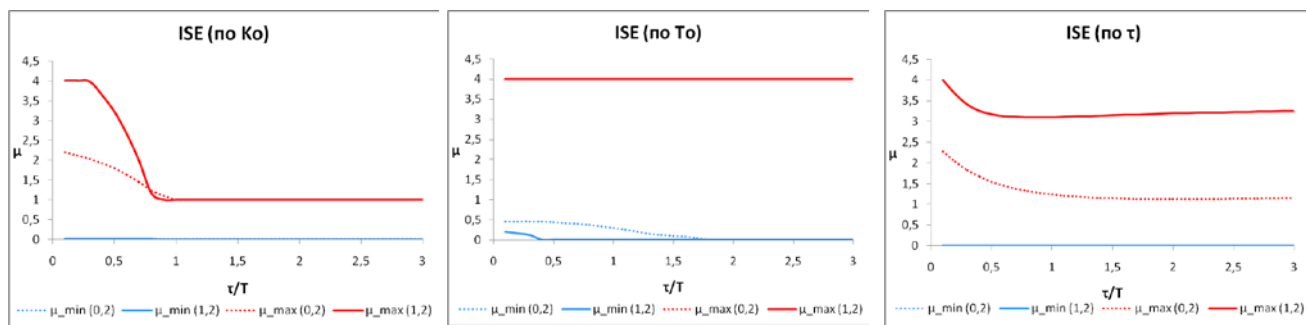
a)



б)



в)



г)

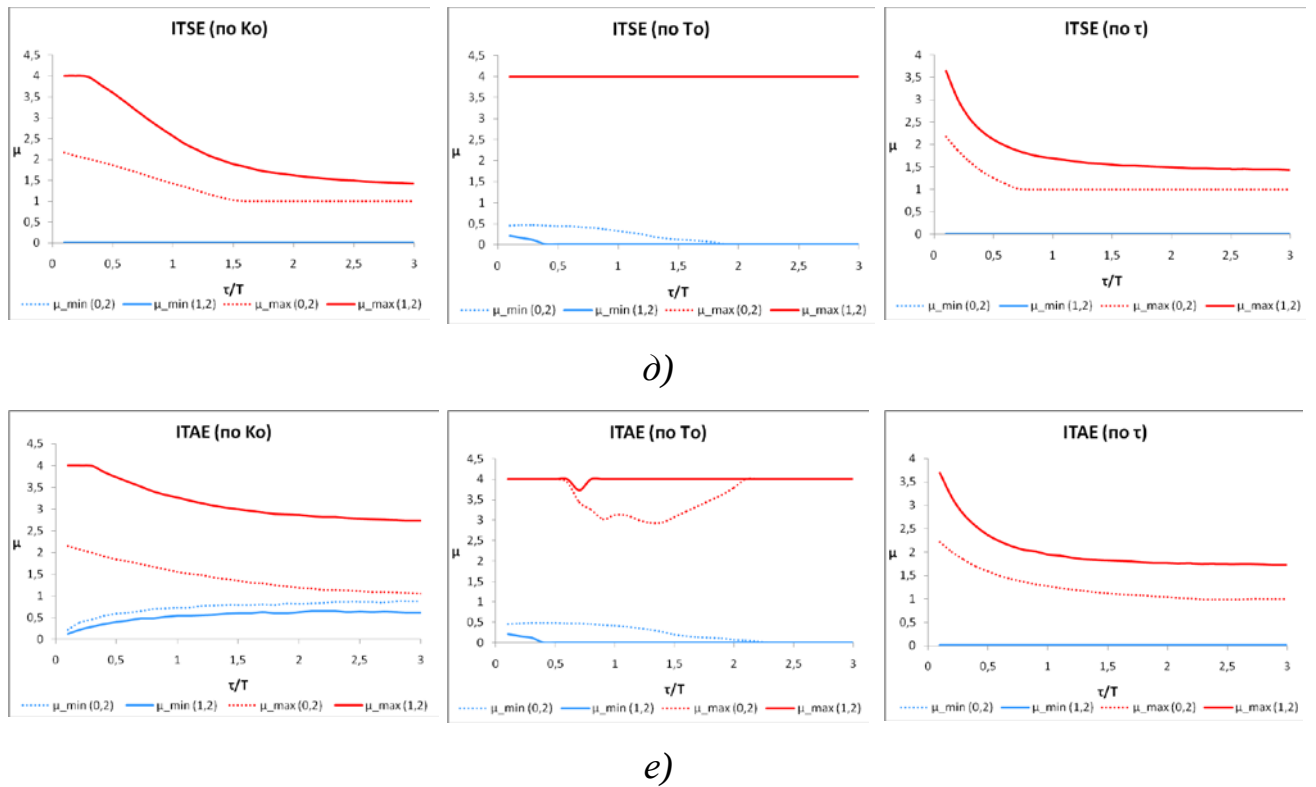


Рис. 3.19. Граничні значення зміни параметра об'єкта, при яких система лишається робастною за визначеним показником:

a – ступінь згасання; b – динамічна похибка; v – динамічне відхилення; z – інтегральний квадратичний критерій; d – зважений інтегральний квадратичний критерій; e – зважений абсолютний інтегральний критерій.

Аналізуючи Рис. 3.19 можна відзначити, що допустимі межі змін параметрів об'єкта в значній мірі залежать від параметрів налаштування регулятора, які в свою чергу однозначно залежать від міри якості λ (Табл. 3.1). Чим більше λ , тим ширші межі змін параметрів об'єкта для того, щоб система лишалась робастною. При зменшенні λ ми звужуємо діапазон зміни параметрів об'єкта, але покращуємо саму якість перехідних процесів системи. Окрім того, значною мірою на робастність системи впливає ступінь складності керування об'єктом (τ/T). Так, наприклад, при $\tau/T > 1,5$ по показнику $ITSE$ система стає неробастною при мінімальній зміні коефіцієнта передачі об'єкта K_0 .

Табл. 3.1. Межі змін параметрів об'єкта для робастності по основним критеріям

Критерій	Межі зміни $K_{об}$	Межі зміни $T_{об}$	Межі зміни $\tau_{об}$
<i>Перерегулювання</i>	280%	50%	340%
<i>Динамічне відхилення</i>	230%	50%	250%
<i>Час регулювання</i>	170% (при $\tau/T < 1,5$)	50% (при $\tau/T < 1,5$)	150% (при $\tau/T < 1,5$)
<i>ISE</i>	30% (при $\tau/T < 1,0$)	50% (при $\tau/T < 1,0$)	10% (при $\tau/T < 1,0$)
<i>ITSE</i>	150%	50%	120%
<i>ITAE</i>	150%	50%	140%

3.9. Дослідження роботи запропонованих регуляторів на прикладі локальних систем керування котлоагрегатом

Застосуємо наведену методику налаштування H_{∞} -ІМС-регулятора для дослідження роботи САК температури на різних ділянках водо-парового тракту прямооточного котла. За результатами моделювання був виконаний порівняльний аналіз систем з синтезованими та штатними регуляторами, які встановлені на Трипільській ТЕС і налаштовані на режим максимального (300 МВт) і мінімального (225 МВт) навантаження.

Таким чином, моделювання охоплювало досить широкий діапазон змін параметрів об'єкта, який відображає як зміну навантаження енергоблоку в його робочих межах, так і інші невизначеності, що впливають на відхилення його робочих параметрів від номінальних значень.

3.9.1. АСК температури за НРЧ

Ділянка водо-парового тракту котла в частині нижнього радіаційного теплообмінника характеризується температурою НРЧ і описується моделлю вигляду (2.6). Використовуючи отримані залежності показників якості від налаштування регулятора з внутрішньою моделлю задаємо основні вимоги до роботи САР температурного режиму, наведені у п.1.1.3. Для посилення вимог робастності додамо умову на запас стійкості по фазі – 60° , при мінімальному

часі регулювання та найменшій динамічній похибці регулювання. При цьому регулятор із внутрішньою моделлю налаштовується на режим зниженого навантаження, коли параметри об'єкта приймають свої "найгірші" значення.

Заданим вимогам задовольняють такі значення параметрів H_{∞} -ІМС-регуляторів:

- регулятор з одним ступенем свободи – міра якості $\lambda/\tau=1,0$.
- регулятор із двома ступенями свободи – міра якості регулятора завдання $\lambda_r/\tau=0,9$ та міра якості регулятора збурення $\lambda_d/\tau=0,35$.

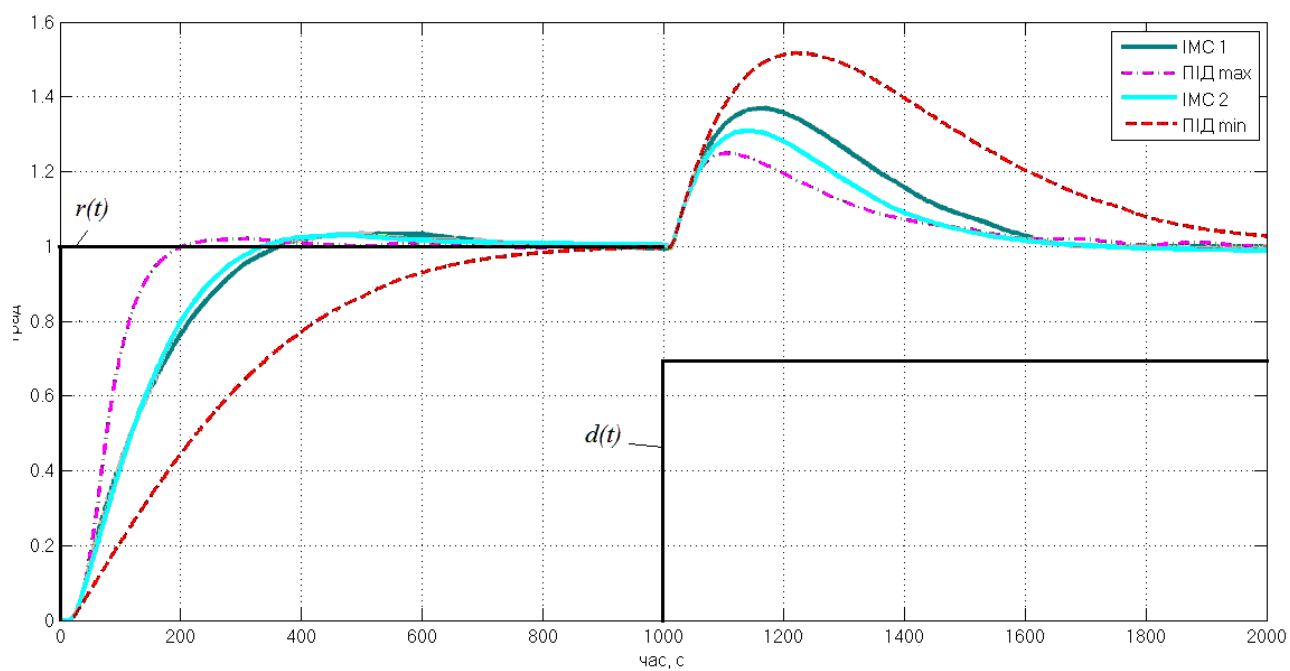
Штатний регулятор, налаштований на роботу в режимі максимального навантаження, має таку передавальну функцію:

$$W_{um}^{300}(s) = 15 \left(1 + \frac{1}{150s} + \frac{12s+1}{s+1} \right)$$

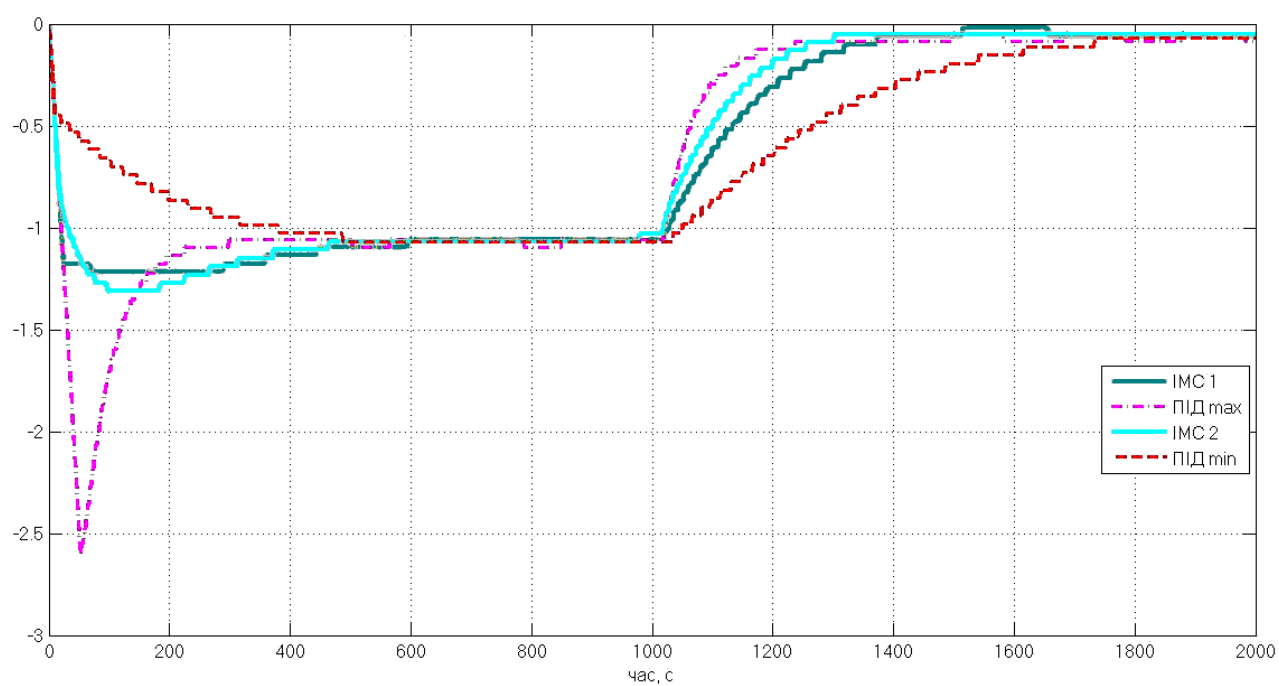
Штатний регулятор, налаштований на роботу в режимі мінімального навантаження, описується передавальною функцією з такими параметрами:

$$W_{um}^{225}(s) = 4 \left(1 + \frac{1}{120s} + \frac{10s+1}{s+1} \right)$$

Порівняємо роботу регуляторів в однакових режимах роботи. При цьому результати будуть наведені для випадку з виконавчим механізмом сталої швидкості, який має такі характеристики: час повного ходу – 20 с, керування – трипозиційне. Перехідні процеси для замкнених систем керування з різними регуляторами наведені на Рис. 3.20. Підсумкові чисельні значення показників якості функціонування САР з пропонованими регуляторами у порівнянні із штатними регуляторами наведені в Табл. 3.2.



а) вихідна величина



б) положення виконавчого механізму по каналу завдання

Рис. 3.20. Перехідні процеси у системі НРЧ з різними регуляторами при навантаженні 300 МВт

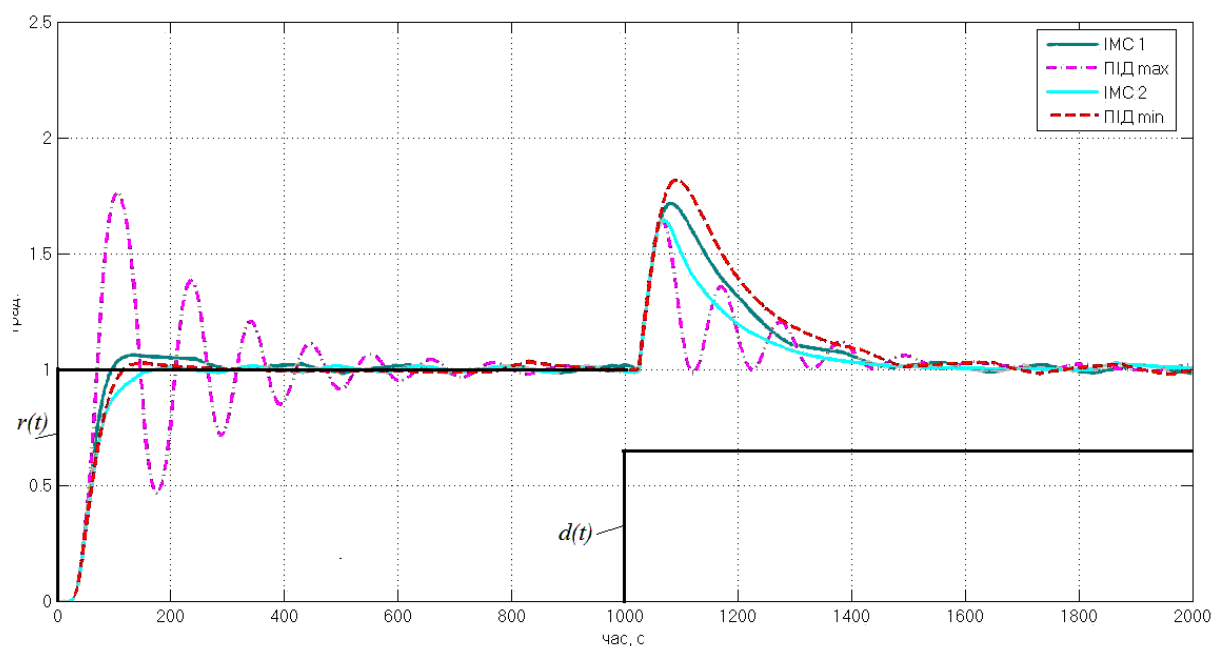
Табл. 3.2. Показники якості перехідних процесів у системі НРЧ при
максимальному навантаженні

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-IMC_1		H_{∞}-IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	100	100	100	100	100	100	100	100
Перерегулювання, σ	30	0	0	0	30	0	10	0
Динамічне відхилення, Δ	0,3	0,24	0	0,47	0,3	0,39	0,1	0,31
Час регулювання, t_s	378	710	835	1020	620	615	575	605
ISE	652	11	461,9	451,5	583	32	589	20
IAE	669	72	38540	236600	621	121	624	92
$ITAE$	278468	16825	198900	446300	273138	29735	273444	20277
Максимум функції чутливості, M_S	1,75		1,1		1,29		1,19	
Запас стійкості по модулю, m	5,7		12,4		17,7		13,7	
Запас стійкості по фазі, β	60		62		72,4		65	

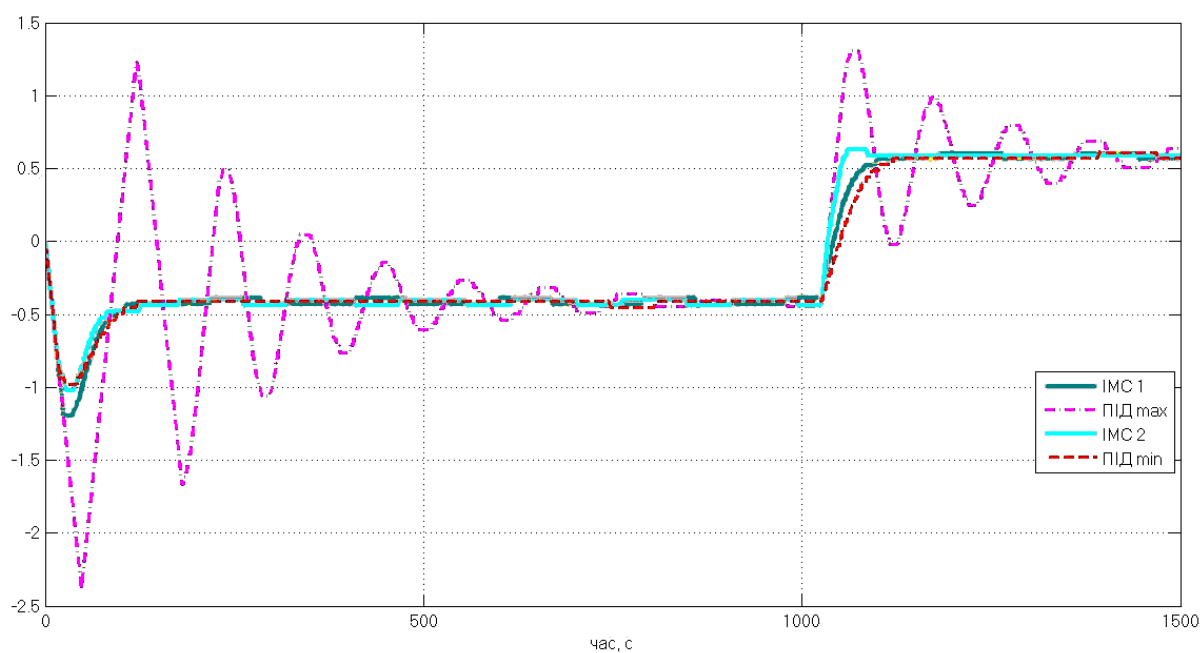
При переході у режим мінімального навантаження отримані наступні результати. Перехідні процеси для замкнених систем керування з різними регуляторами наведені на Рис. 3.21. Підсумкові чисельні значення показників якості функціонування САР наведені в Табл. 3.3.

Табл. 3.3. Показники якості перехідних процесів у системі НРЧ при
мінімальному навантаженні

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-IMC_1		H_{∞}-IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	65	44	100	100	100	100	100	100
Перерегулювання, σ	47	93	5	0	8	0	2,5	0
Динамічне відхилення, Δ	0,75	0,62	0,05	0,85	0,08	0,69	0,025	0,55
Час регулювання, t_s	870	530	170	450	290	430	140	435
ISE	777	122	375	717,3	702	54	667	32
IAE	718	174	71000	268800	700	121	682	89
$ITAE$	281109	14620	161900	307000	281709	20234	278698	13996
Максимум функції чутливості, M_S	9,13		1,65		1,39		1,54	
Запас стійкості по модулю, m	1,2		3,44		4,2		3,34	
Запас стійкості по фазі, β	10,1		60		69,8		60,6	



а) вихідна величина



б) положення виконавчого механізму

Рис. 3.21. Перехідні процеси у системі НРЧ з різними регуляторами при навантаженні 225 МВт

На основі аналізу графіків перехідних процесів представлених АСК температури в нижній радіаційній частині, можна зробити висновок, що при роботі котлоагрегата на максимальному навантаженні, системи з H_{∞} -ІМС-

регулятором з одним ступенем свободи (H_{∞} - IMC_1) та з H_{∞} - IMC -регулятором з двома ступенями свободи (H_{∞} - IMC_2) у порівнянні зі штатною системою, налаштованою на максимальний режим (Штат_max), мають незначне погіршення якості функціонування – в середньому по представленим показникам якості на -16% H_{∞} - IMC_1 і на -8% H_{∞} - IMC_2 . Проте, при переході котла на роботу при зниженому навантаженні маємо покращення якості відносно Штат_max на 36% для H_{∞} - IMC_1 і на 46% для H_{∞} - IMC_2 .

Що стосується роботи котлоагрегата при мінімальному навантаженні, то регулятори H_{∞} - IMC_1 та H_{∞} - IMC_2 у порівнянні зі штатною системою, налаштованою на мінімальний режим (Штат_min), практично не поступаються якістю роботи. Зате при збільшенні навантаження до максимального, вони покращують якість перехідних процесів (зокрема, зменшуються динамічне відхилення в середньому на 15% та час регулювання на 35%).

Якщо ж розглядати роботу систему в повному діапазоні змін параметрів об'єкта при зміні тільки навантаження, то системи з H_{∞} - IMC -регуляторами є більш робастними при незначному погіршенні якості. Щоб продемонструвати робастність САК скористаємось відносним коефіцієнтом чутливості (3.48). Результуючі значення цього коефіцієнта наведені в Табл. 3.4.

Табл. 3.4. Відносний показник чутливості в системі НРЧ

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-IMC_1		H_{∞}-IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	0,44	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Перерегулювання, σ	0,72	0,00	0,00	0,00	0,93	0,00	0,95	0,00
Динамічне відхилення, Δ	1,90	2,00	0,00	1,02	0,93	0,97	0,95	0,98
Час регулювання, t_s	1,65	0,32	1,01	0,71	0,67	0,38	0,96	0,36
ISE	0,24	6,08	0,24	0,74	0,26	0,87	0,17	0,76
IAE	0,09	1,79	1,06	0,17	0,16	0,00	0,12	0,04
$ITAE$	0,01	0,17	0,24	0,39	0,04	0,40	0,02	0,39

Таким чином, системи з H_{∞} - IMC -регуляторами для ділянки нижньої радіаційної частини є робастними при зміні навантаження за всіма основними показниками якості, так як відносний коефіцієнт чутливості менший за

одиницю. Штатні системи не є робастними у всьому діапазоні при зміні параметрів об'єкта, зокрема по динамічному відхиленню, часу регулювання та деяким інтегральним показникам.

3.9.2. АСК температури за ВРЧ

Налаштування регулятора з внутрішньою моделлю проведемо згідно вимог і методики налаштування, розглянутих вище у п.3.9.1. Відмінність полягає в тому, що дана ділянка описується моделлю другого порядку (2.7).

У результаті для даних параметрів моделі і наведених вимог отримуємо:

- регулятор із внутрішньою моделлю і одним ступенем свободи з мірою якості $\lambda/\tau=0,75$.
- регулятор з двома ступенями свободи з мірою якості регулятора завдання $\lambda_r/\tau=1,1$ та з мірою якості регулятора збурення $\lambda_d/\tau=0,5$.

Штатний регулятор, налаштований на роботу в режимі максимального навантаження, має таку передавальну функцію:

$$W_{um}^{300}(s) = 2,4 \left(1 + \frac{1}{180s} + \frac{15s+1}{s+1} \right)$$

Штатний регулятор, налаштований на роботу в режимі мінімального навантаження, описується передавальною функцією з такими параметрами:

$$W_{um}^{225}(s) = 0,8 \left(1 + \frac{1}{120s} + \frac{8s+1}{s+1} \right)$$

Порівняємо роботу регуляторів в однакових режимах роботи. При цьому результати будуть наведені для випадку з виконавчим механізмом сталої швидкості, який має такі характеристики: час повного ходу – 20 с, керування – трипозиційне. Перехідні процеси для замкнених систем керування з різними регуляторами наведені на Рис. 3.22. Підсумкові чисельні значення показників якості функціонування САК з пропонованими регуляторами у порівнянні із штатними регуляторами наведені в Табл. 3.5.

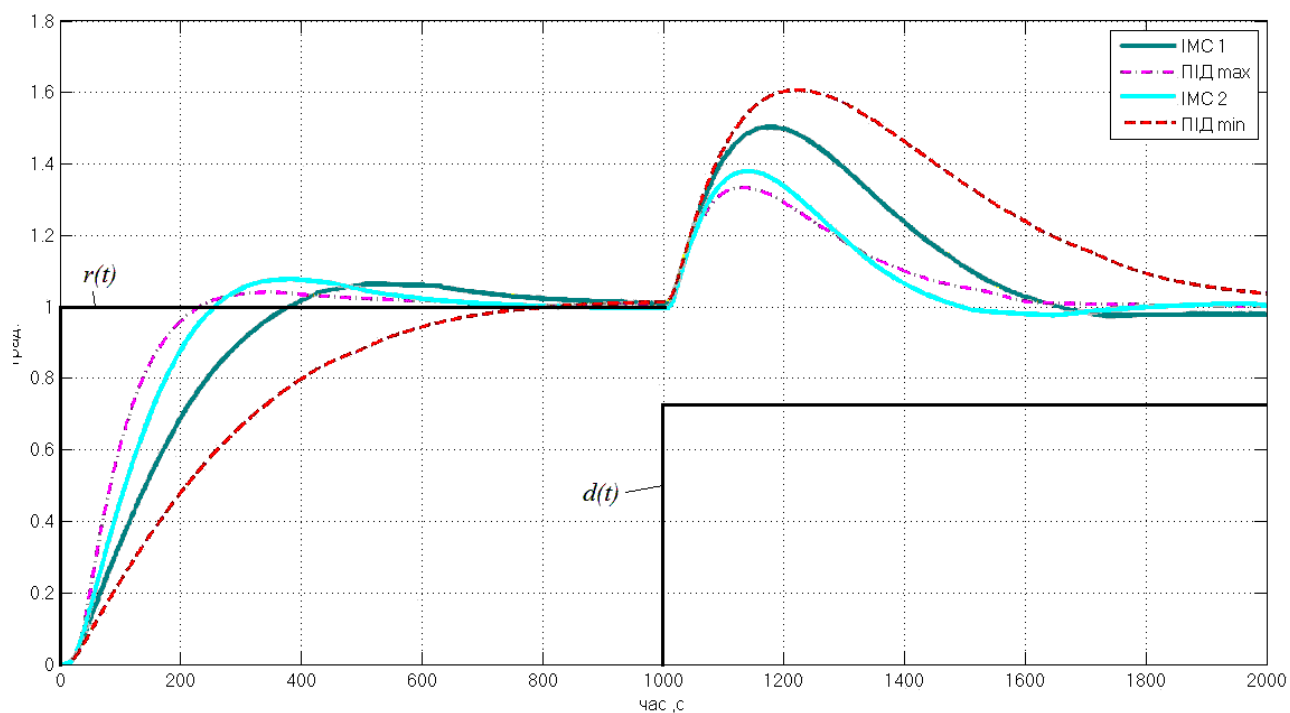
Табл. 3.5. Показники якості перехідних процесів у системі ВРЧ при
максимальному навантаженні

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-IMC_1		H_{∞}-IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	100	100	100	100	100	100	100	100
Перерегулювання, σ	5,5	0	0	0	7	0	9	0
Динамічне відхилення, Δ	0,055	0,32	0	0,61	0,07	0,53	0,09	0,39
Час регулювання, t_s	430	710	725	1150	630	670	680	660
ISE	556,2	0,935	863	2,773	832	0,7	884	0,3
IAE	77390	367,4	77330	1301	864	19	901	11
$ITAE$	183100	13660	477600	28320	495590	5468	498459	2335
Максимум функції чутливості, M_S	1,32		1,44		1,44		1,59	
Запас стійкості по модулю, m	7,5		7,8		7,8		6,75	
Запас стійкості по фазі, β	65		60,6		60,6		50,2	

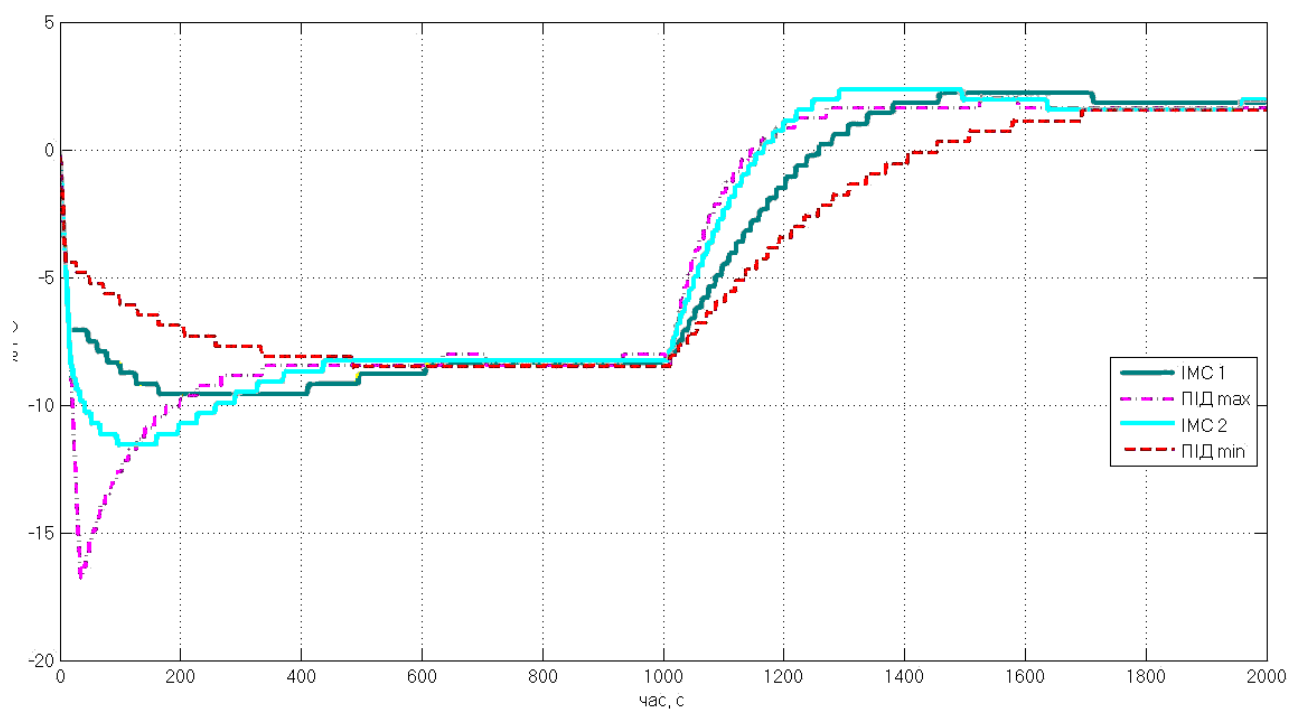
При переході у режим мінімального навантаження отримані наступні результати: перехідні процеси для замкнених систем керування з різними регуляторами наведені на Рис. 3.23. Підсумкові чисельні значення показників якості функціонування САР наведені в Табл. 3.6.

Табл. 3.6. Показники якості перехідних процесів у системі ВРЧ при
мінімальному навантаженні

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-IMC_1		H_{∞}-IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	62	46	100	100	100	100	100	100
Перерегулювання, σ	51	0	5	0	8	0	10	0
Динамічне відхилення, Δ	0,45	0,75	0,05	1,16	0,08	1,07	0,1	0,8
Час регулювання, t_s	330	560	330	530	240	520	155	535
ISE	1098,5	1,619	756,4	3,382	939	1,3	944	0,5
IAE	60200	949,6	37250	961,3	942	18	947	18
$ITAE$	883200	50460	365420	12530	498965	3073	498861	2798
Максимум функції чутливості, M_S	23,1		1,46		1,46		1,6	
Запас стійкості по модулю, m	1,05		3,9		3,9		3,26	
Запас стійкості по фазі, β	12,6		65,1		65,1		57,5	

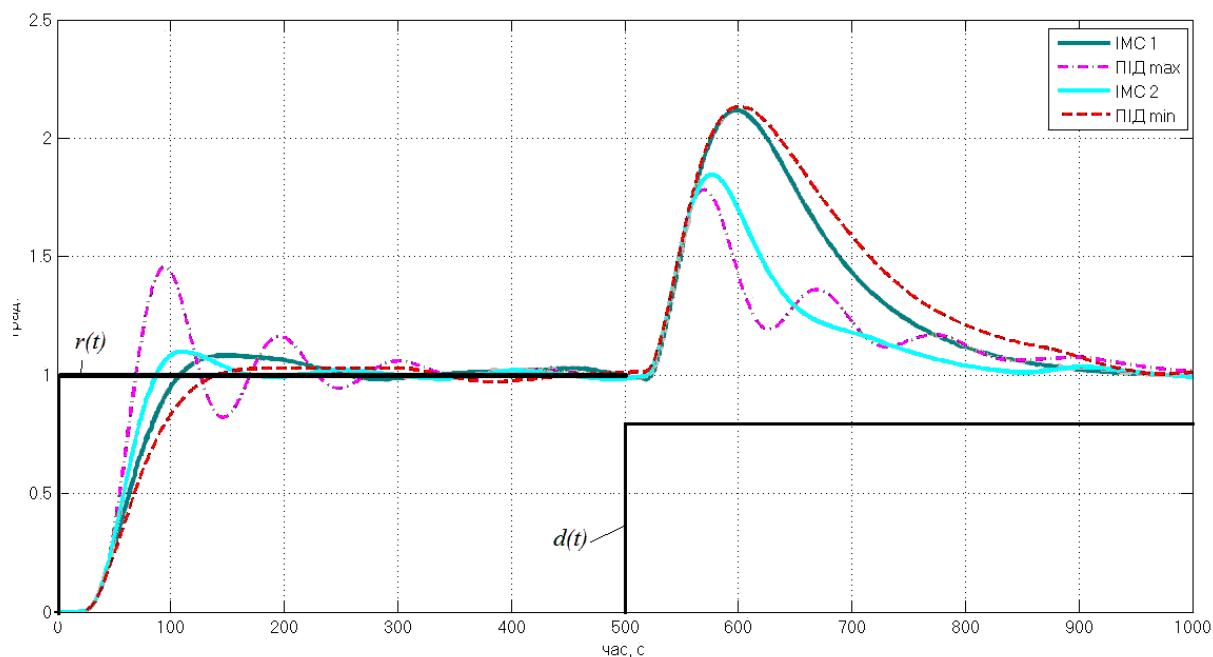


а) вихідна величина

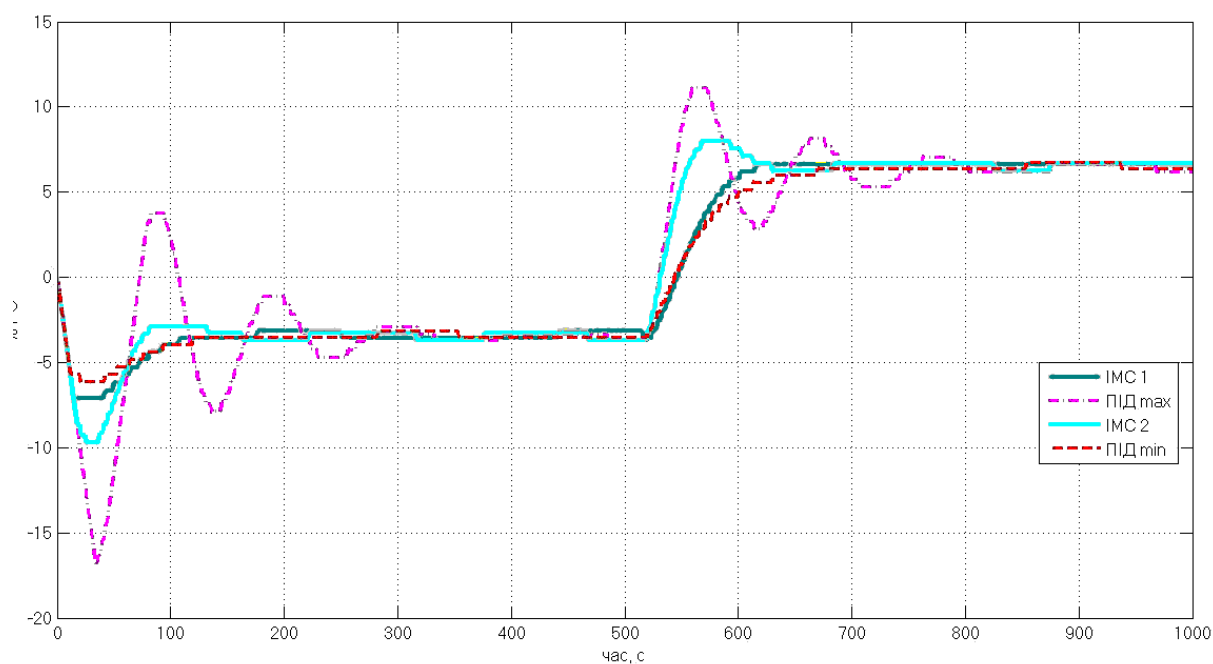


б) положення виконавчого механізму по каналу завдання

Рис. 3.22. Перехідні процеси у системі ВРЧ з різними регуляторами при навантаженні 300 МВт



а) вихідна величина



б) положення виконавчого механізму

Рис. 3.23. Перехідні процеси у системі ВРЧ з різними регуляторами при навантаженні 225 МВт

Аналізуючи графіки перехідних процесів температури в точці верхньої радіаційної частини, можна зробити висновок, що локальні штатні системи, налаштовані на конкретний режим навантаження енергоблоку забезпечують

ненабагато кращу якість функціонування систем в кожному окремому випадку (13% і 10% відповідно у порівнянні з H_{∞} -ІМС_1 та H_{∞} -ІМС_2). Проте, у режимі роботи при зниженому навантаженні в системі зі штатним регулятором налаштованим на максимальний режим значно погіршуються показники якості, і при цьому система виходить на границю стійкості. А в системі зі штатним регулятором налаштованим на мінімальний режим при максимальному навантаженні значно затягуються перехідні процеси. Загальне покращення якості складає 37% і 45% відповідно у порівнянні з H_{∞} -ІМС_1 та H_{∞} -ІМС_2.

Окрім того, в системах з H_{∞} -ІМС-регуляторами виконавчий механізм виконує менше число включень, в середньому на 10%.

Щоб продемонструвати робастність САК скористаємось коефіцієнтом (3.48). Результуючі значення відносного коефіцієнта чутливості наведені в Табл. 3.7.

Табл. 3.7. Відносний показник чутливості систем ВРЧ

Показники якості	Штат max		Штат min		H_{∞}-ІМС_1		H_{∞}-ІМС_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
Степінь затухання, ϕ	0,64	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Перерегулювання, σ	42,34	0,00	0,00	0,00	0,93	0,00	0,42	0,00
Динамічне відхилення, Δ	46,76	2,02	0,00	1,46	0,84	0,98	0,42	0,98
Час регулювання, t_s	4,02	0,16	0,93	0,55	0,69	0,35	0,89	0,15
ISE	0,24	1,26	0,89	0,74	0,26	0,87	0,17	0,76
IAE	0,09	0,04	1,06	0,17	0,16	0,00	0,12	0,04
$ITAE$	0,01	0,17	0,24	0,39	0,04	0,40	0,02	0,39

За результатами виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

- застосування стандартного регулятора, налаштованого на штатний режим не може забезпечити бажаного запасу стійкості системи регулювання при зміні параметрів об'єкта керування;
- системи з H_{∞} -ІМС-регуляторами є робастними по всім основним показникам якості, при цьому забезпечуються показники якості не гірше заданих;

- виконавчий механізм в системах з H_{∞} -ІМС-регуляторами виконує менше переміщень і включень в середньому на 10%;
- введення другого ступеня свободи покращує перехідні процеси при відпрацюванні завдань та компенсації збурень, порівняно з регулятором із одним ступенем свободи (в середньому на 8%), але при цьому з'являється додатковий параметр налаштування.

Питанню модернізації САК інерційних контурів пиловугільних котлоагрегатів ТЕС присвячена також робота [49]. В ній розглядається можливість введення додаткового паралельного контуру динамічної корекції, що підвищує швидкодію без зменшення стійкості системи при зміні параметрів об'єкта. Розроблена нова структура регулятора з динамічним коректором та методики його налаштування на задані показники якості. Для цього запропоновано двоканальна структура формування керуючого сигналу. Керуючий вплив формується за допомогою двох паралельних каналів, один з яких є швидкодіючим ПІ-регулятором, а інший – динамічним коректором з запізненням, причому сигнал коригуючого каналу віднімається від сигналу швидкодіючого каналу. 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.

У [93] та [95] були проведені дослідження методів проектування автоматичних систем регулювання, які ефективні у порівняно широкому діапазоні невизначеностей, типових для інерційних об'єктів керування теплоенергетики. До того ж, враховувалась простота застосування і можливість оцінювання якості функціонування за допомогою прямих показників. Для вирішення поставленого завдання розглядалась можливість застосування H_{∞} -ІМС-регулятора з використанням прямих показників якості та методика використання динамічної корекції. Виконано порівняння двох використовуваних підходів. За результатами проведених досліджень можна вважати, що регулятори ПІ-К та H_{∞} -ІМС є робастними на всьому робочому

діапазоні змін параметрів енергоблоку, так як основні розглянуті показники якості не зазнали значних змін, на відміну від показників штатного регулятора. При цьому в системі з H_∞ -ІМС-регулятором спостерігалась незначне покращення якості роботи на 2-5%. Проте, ПІ-К регулятор, який не містить диференційної складової, менш чутливий до шумів вимірювання, що призводить до меншої кількості включень виконавчого механізму, на відміну від H_∞ -ІМС-регулятора.

3.10. Висновки до Розділу 3

1. Розроблений принцип побудови системи керування з використанням внутрішньої моделі об'єкта керування дозволяє гарантовано отримати робастну систему, враховуючи параметризацію регулятора з внутрішньою моделлю. Причому серед знайдених регуляторів, що забезпечують стійкість можна обрати той, який надасть системі потрібної якості.

2. У процесі синтезу регулятор з внутрішньою моделлю повинен доповнюватися фільтром низьких частот. Враховуючи обмеження, які накладаються на фільтр, а також типовий вид збурення в системах температурного режиму пари в котлі, пропонується обирати фільтр у вигляді структури (3.13).

3. Отримані структури регуляторів з внутрішньою моделлю, на основі H_∞ -норми замкненої системи, які, орієнтуючись на "найгірший" режим роботи, гарантують однозначну стійкість, і при цьому, шляхом вибору параметра налаштування регулятора, надають системі потрібну, наперед визначену якість функціонування. Показано, що такий регулятор може бути приведений до структури стандартного ПІД-регулятора. Розроблений метод забезпечує плавний перехід між класичними вимогами синтезу та результатом оптимального синтезу. З одного боку, регулятор аналітично отриманий шляхом досягнення оптимального показника якості. З іншого боку, параметри регулятора безпосередньо пов'язані з практичними вимогами до систем керування.

4. Критерій оптимальності у вигляді H_∞ -норми замкненої системи уможливорює просте й швидке налаштування регулятора для об'єктів 1-го та 2-го порядку з запізнюванням. Ці налаштування напряду залежать від параметрів об'єкта та від значення єдиного змінного параметра регулятора. Змінюючи цей коефіцієнт, можна гарантовано отримати заданий прямий показник якості, який зручний для практики, або досягти бажаного поєднання декількох ПЯФ для гіршого випадку роботи системи, тим самим забезпечити її робастність з заданою якістю.

5. Допустимі межі змін параметрів об'єкта великою мірою залежать від параметрів налаштування регулятора, які в свою чергу однозначно залежать від міри якості λ . Чим більше λ , тим ширші межі змін параметрів об'єкта для того, щоб система лишалась робастною. При зменшенні звужуємо діапазон зміни параметрів об'єкта, але покращуємо саму якість перехідних процесів системи. Окрім того, значною мірою на робастність системи впливає ступінь складності керування об'єктом (τ/T). Проте, система з H_∞ -ІМС-регулятором залишається робастною по більшості показникам якості в діапазонах змін параметрів об'єкта не менше, ніж 50% від номінального.

6. Під час моделювання отримані однозначні залежності основних показників якості функціонування системи від параметра налаштування для всіх типів моделей об'єкту та регуляторів з одним та двома ступенями свободи. У результаті сформовано масив даних, а на його базі створена програма, що дозволяє підібрати параметри налаштування регулятора, який, будучи робастним, гарантує досягнення показників якості не гірше заданих.

7. Досліджено роботу систем регулювання температури пари при змінних режимах функціонування енергоблоку від мінімального 225 МВт до номінального 300 МВт навантаження. Використання розробленої методики налаштування дозволило забезпечити робастність системи на всьому діапазоні змін параметрів об'єкта і при цьому гарантувати задані показники якості функціонування системи.

РОЗДІЛ 4

АПАРАТНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ РІШЕНЬ НА БАЗІ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕХНІКИ

4.1. Апаратне забезпечення систем автоматизованого керування

Технічну реалізацію запропонованих алгоритмів розроблено на базі мікропроцесорного контролера від компанії PhoenixContact серії Inline. Вибір контролера ґрунтувався на відповідності функціональних характеристик контролера вирішуваному завданню за умови мінімальної його вартості.

Inline – це гнучка універсальна система для розподільної шафи у модульному виконанні. Великий вибір модулів вводу/виводу й функціональних клем для всіх розповсюджених систем польової шини й мереж Ethernet дозволяє самотійно компонувати рішення з автоматизації. Модулі розподіленого введення та виведення мають конфігурації на 1, 2, 4, 8, 16 або 32 канали, що дозволяє формувати саме таку структуру, яка необхідна для вирішення конкретної задачі. А, за необхідності, і виконувати маловитратну модернізацію. Комунікаційні модулі дозволяють додатково підключати різноманітні підсистеми – без використання ще одного пристрою сполучення шини.

Модулі Inline відповідають великій кількості галузевих та національних стандартів, у тому числі EN 61000-6, EN 60529:1991, E175199, E198726, ANSI/ISA 12.12.01.

ILC130 ETH – це модульний високопродуктивний компактний контролер, який використовується у невеликих системах. Через вбудований Ethernet-інтерфейс можливе налаштування та програмування за допомогою програмного забезпечення для автоматизації PC WorX згідно з MEK 61131, паралельний обмін даними з OPC-серверами та комунікація із кінцевими пристроями, які підтримують протокол TCP/IP.

Характеристики контролера:

- Інтерфейс Ethernet 10Base-T/100Base-TX;
- підтримка комунікаційних протоколів: HTTP, FTP, SNMP, SMTP, SQL, MySQL та ін.;
- вбудований веб-сервер для візуалізації за допомогою WebVisit;
- FTP-сервер;
- файлова система Flash;
- швидкість обробки даних: 1,7 мс (1 К змішаних команд), 90 мкс (1 Кбіт-команд);
- пам'ять для програм: 192 кБайт (16 К команд IL);
- пам'ять для даних: 192 кБайт;
- пам'ять для постійного збереження даних: 8 кБайт (NVRAM);
- кількість задач управління: 8;
- годинник реального часу.

Контролер під'єднується до робочої станції (ПК) через інтерфейс Ethernet. Обмін даними відбувається за допомогою стеку протоколів TCP/IP.

4.2. Властивості інтегрованого середовища розробки прикладного проекту автоматизації

Для ефективного використання контролерів *PhoenixContact* виробник розробив ряд спеціалізованого прикладного програмного забезпечення, об'єднаного в програмний комплекс AUTOMATION WORX Software Suite. Він призначений для розробки топології інформаційної системи автоматизації, програмування та конфігурації окремих засобів та їх взаємодії, діагностики та моніторингу стану системи та її компонентів.

PC Worx є частиною AUTOMATION WORX Software Suite являє собою універсальне ПЗ технічної розробки для всіх контролерів *PhoenixContact*. Воно поєднує в собі можливості програмування згідно зі стандартом MEK 61131, конфігурування польових шин та діагностики установки. Це означає узгодженість апаратного та програмного забезпечення. За допомогою PC WORX можна реалізувати трудомісткі концепції автоматизації.

Середовище розробки PC WORX ПЗ PC WORX дозволяє ефективно програмувати задачі автоматизації, включно з тими, до яких висуваються підвищені вимоги. Для цього в ПЗ пропонує ряд корисних функцій, таких як: підтримка всіх мов міжнародного стандарту MEK 61131-3 та можливість їх перехресного перекладу, асистенти/зразки проектів, підтримка кількох користувачів і захист пароллями, неявна адресація, засоби порівняння проектів і контролю версій.

Сучасні проекти автоматизації теплоенергетичної галузі будуються не лише на основі складних алгоритмів керування, а й мають в основі розгалужену мережу технічних засобів та пристроїв. Зважаючи на це, від середовища розробки вимагається мати засоби конфігурації мережевої топології та окремих її компонентів.

ПЗ PC WORX підтримує ряд найпоширеніших протоколів промислових інформаційних шин, у тому числі INTERBUS, PROFINET, Profibus та Modbus-TCP, та інтегрує інструменти їх конфігурування: просте проектування багатьох мереж ПЛК в одному проекті, звична деревоподібна структура відображення мереж, готовий каталог пристроїв та модулів, зчитування даних PROFINET та INTERBUS, зчитування даних топології PROFINET, присвоювання пристроям імен DNS/PROFINET та IP-адрес.

Надважливою функцією засобів розробки є діагностика та моніторинг виконання програмного коду, що обумовлене високими вимогами до безпеки об'єктів теплоенергетичної галузі. Інтегроване середовище розробки дозволяє: вносити зміни в інтерактивному режимі, графічно відображувати примусово задані змінні в програмному коді, керувати наборами параметрів, використовувати вбудований логічний аналізатор для візуального аналізу роботи алгоритмів.

Завдяки оболонці для симуляції можна протестувати програму без підключення до апаратного ПЛК. Потім можна просто переключитися з режиму симуляції в режим реальної установки.

Під час моделювання дані між моделлю та контролером передаються за такою схемою: OPC-сервером, який використовується для обміну даними між ПЛК і моделлю об'єкта, є AX OPC Server. Згідно зі стандартом Ethernet-мережі, комунікація між пристроями здійснюється за допомогою IP-адрес, що привласнюються кожному пристрою користувачем.

4.3. Програмно-технічна реалізація інерційних контурів регулювання

Для можливості застосування розроблених регуляторів на практиці було розроблено прикладну бібліотеку функціональних блоків для контролерів компанії PhoenixContact.

Бібліотека отримала назву IMC. До її складу входять 5 функціональних блоків:

- 1) IMC_1ord_1DoF – реалізовує регулятор з одним ступенем свободи для об'єкта першого порядку (Рис. 4.1).
- 2) IMC_1ord_2DoF - реалізовує регулятор з двома ступенями свободи для об'єкта першого порядку (Рис. 4.2).
- 3) IMC_2ord_1DoF - реалізовує регулятор з одним ступенем свободи для об'єкта другого порядку (Рис. 4.3).
- 4) IMC_2ord_2DoF - реалізовує регулятор з двома ступенями свободи для об'єкта другого порядку (Рис. 4.4).
- 5) SecondDoF – допоміжний блок, який реалізовує ланку (3.43).

та одна допоміжна функція SafeDiv, яка забезпечує захист від ділення на 0.

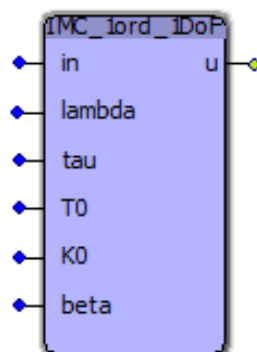


Рис. 4.1. Функціональний блок регулятора з одним ступенем свободи для об'єкта першого порядку

Блок має 6 вхідних параметрів:

- in – відхилення поточного значення регульованої величини від заданого;
- lambda – значення міра якості регулятора λ ;
- tau – час запізнення об'єкта регулювання;
- T0 – стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- K0 – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання;
- beta – множник сталої інтегрування регулятора. Для регуляторів із одним ступенем свободи має значення за замовчуванням 1.

та один вихідний:

- u – розрахований вихід регулятора.

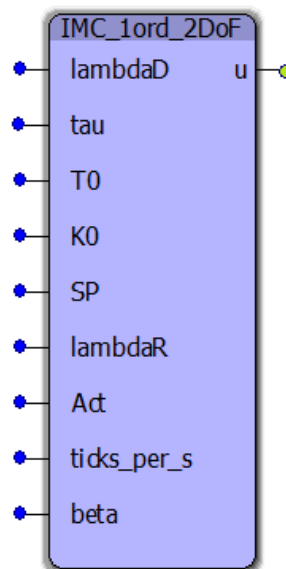


Рис. 4.2. Функціональний блок регулятора з двома ступенями свободи для об'єкта другого порядку

Блок має 9 вхідних параметрів:

- lambdaD – значення міра якості λ регулятора збурення;
- tau – час запізнення об'єкта регулювання;
- T0 – стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- K0 – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання;
- SP – задане значення;
- lambdaR – значення міра якості регулятора завдання;
- Act – поточне значення регульованої величини;

- ticks_per_s – кількість виконаних циклів програми за 1 с, службове значення контролера (використовується для обчислення кроку квантування);
- beta – множник сталої інтегрування регулятора збурення.
та один вихідний:
- u – розрахований вихід регулятора.

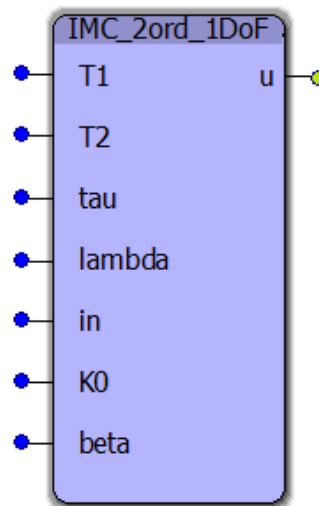


Рис. 4.3. Функціональний блок регулятора з одним ступенем свободи для об'єкта другого порядку

Блок має 7 вхідних параметрів:

- T1 – перша стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- T2 – друга стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- tau – час запізнення об'єкта регулювання;
- lambda – значення міра якості регулятора λ ;
- in – відхилення поточного значення регульованої величини від заданого;
- K0 – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання;
- beta – множник сталої інтегрування регулятора збурення.

та один вихідний:

- u – розрахований вихід регулятора.

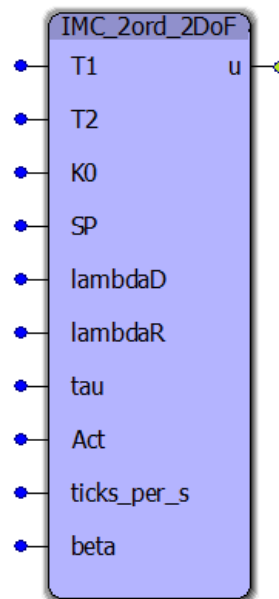


Рис. 4.4. Функціональний блок регулятора з двома ступенями свободи для об'єкта другого порядку

Блок має 10 вхідних параметрів:

- T1 – перша стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- T2 – друга стала часу запізнення об'єкта регулювання;
- K0 – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання;
- SP – задане значення;
- lambdaD – значення міра якості регулятора збурення;
- lambdaR – значення міра якості регулятора завдання;
- tau – час запізнення об'єкта регулювання;
- Act – поточне значення регульованої величини;
- ticks_per_s – кількість виконаних циклів програми за 1 с, службове значення контролера (використовується для обчислення кроку квантування);
- beta – множник сталої інтегрування регулятора збурення.

та один вихідний:

- u – розрахований вихід регулятора.

Для правильної роботи бібліотеки до проекту повинна бути додатково підключена бібліотека OSCAT – це бібліотека із відкритим вихідним кодом, яка легко може бути знайдена в мережі Інтернет, зокрема на офіційному сайті www.oscat.de.

4.3.1. Використання бази даних в роботі контролера

Для додаткового зберігання даних для підбору налаштувань регулятора використовується база даних MicrosoftSQLServer, доступ до якої можливо реалізувати із використанням контролерів PhoenixContact. Спеціально для цього була розроблена бібліотека TestSQL, у якій реалізовано єдиний функціональний блок ReadDB, зовнішній вигляд якого показано на Рис. 4.5.

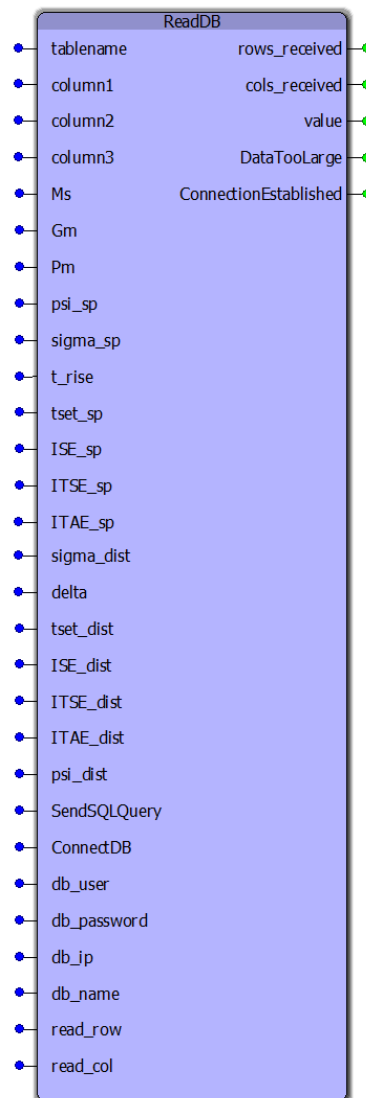


Рис. 4.5. Функціональний блок вибору налаштувань регуляторів із бази даних

Блок має 29 вхідних параметрів:

- tablename – назва таблиці, в якій зберігаються дані для відповідного регулятора (DoF1_FOPDT, DoF2_FOPDT, DoF1_SOPDT, DoF2_SOPDT);

- column1 – назва колонки таблиці для читання міра якості регулятора збурення (λ_d);
- column2 – назва колонки таблиці для читання міра якості регулятора завдання (λ_r);
- column3 – назва колонки таблиці для читання множника сталої інтегрування регулятора (β);
- Ms – заданий максимум функції чутливості;
- Gm – заданий запас стійкості по модулю;
- Pm – заданий запас по фазі;
- psi_sp – задане значення ступеня затухання в каналі завдання-вихід;
- sigma_sp – задане значення перерегулювання в каналі завдання-вихід;
- t_rise – задане значення часу підйому в каналі завдання-вихід;
- tset_sp – задане значення часу регулювання в каналі завдання-вихід;
- ISE_sp – задане значення інтегрального квадратичного критерія в каналі завдання-вихід;
- ITSE_sp – задане значення інтегрального квадратичного часового критерія в каналі завдання-вихід;
- ITAE_sp – задане значення інтегрального абсолютного часового критерія в каналі завдання-вихід;
- sigma_dist – задане значення перерегулювання в каналі збурення-вихід;
- delta – задане значення динамічного відхилення в каналі збурення-вихід;
- tset_dist – задане значення часу регулювання в каналі збурення-вихід;
- ISE_dist – задане значення інтегрального квадратичного критерія в каналі збурення-вихід;
- ITSE_dist – задане значення інтегрального квадратичного часового критерія в каналі збурення-вихід;
- ITAE_dist – задане значення інтегрального абсолютного часового критерія в каналі збурення-вихід;
- psi_dist – задане значення ступеня затухання в каналі збурення-вихід;

- SendSQLQuery – при переході значення із 0 в 1 надсилається запит у базу даних;
- ConnectDB - при переході значення із 0 в 1 встановлюється з'єднання із базою даних;
- db_user – ім'я користувача для з'єднання з базою даних;
- db_password – пароль відповідного користувача;
- db_ip – IP-адреса комп'ютера, на якому знаходиться база даних;
- db_name – назва бази даних;
- read_row – номер рядка, із якого необхідно прочитати отримане значення;
- read_col – номер колонки, із якої необхідно прочитати отримане значення, та 5 вихідних:
 - rows_received – кількість отриманих рядків;
 - cols_received – кількість отриманих колонок;
 - value – отримане значення у заданому рядку та заданій колонці;
 - DataTooLarge – встановлюється в 1, якщо із бази даних отримано занадто багато даних;
 - ConnectionEstablished – поява цього сигналу означає, що з'єднання з базою даних відбулося успішно.

При використанні блока ReadDB необов'язково вказувати одночасно значення для параметрів column1, column2 та column3 – достатньо вказати лише ту колонку, яка цікавить, наприклад, lambda_d, якщо необхідно вчитати лише значення міра якості для регулятора із одним ступенем свободи. Також необов'язково вказувати значення усіх показників якості, достатньо вказати ті значення, на які потрібно налаштувати регулятор. При цьому потрібно вказувати питомих значення показника якості.

Для правильної роботи бібліотеки до проекту повинна бути додатково підключена бібліотека DBFL_SQL_VX_XX – це бібліотека, розроблена компанією *PhoenixContact* для власних контролерів, яка реалізує функціональність доступу до баз даних. Бібліотека може бути завантажена з офіційного сайту компанії *PhoenixContact* – www.phoenixcontact.com.

4.3.2. Приклад застосування H_{∞} -ІМС-регулятора в роботі контролера

Для використання розроблених блоків у прикладній програмі необхідно дотримуватися такої послідовності:

- 1) додати до проекту прикладної програми бібліотеки ІМС та TestSQL;
- 2) створити екземпляр блоку ReadDB;
- 3) до входів блоку підключити змінні, у яких буде вказано, як підключитися до бази даних;
- 4) задати задані значення прямих показників якості;
- 5) підключитися до бази даних і надіслати до неї запит;
- 6) у результаті буде отримано значення міра якості регулятора із внутрішньою моделлю.

Підключення змінних до блоку отримання налаштувань із бази даних показано на Рис. 4.6.

Отримані у п. 6 налаштування регулятора необхідно передати у функціональний блок, що реалізує необхідний регулятор, при цьому повинен бути створений екземпляр функціонального блоку.

Окрім налаштування регулятора, необхідно також вказати параметри об'єкта, який підлягає регулюванню.

У результаті отримано регулятор із необхідними налаштуваннями для забезпечення перехідних процесів регулювання із заданими характеристиками.

Приклад застосування регулятора із одним ступенем свободи для об'єкта першого порядку показано на Рис. 4.7.

котлоагрегату. Якісне регулювання температури може бути досягнуте за умови, що регулятор буде досить швидкодіючим. Проте наявність у контурі регулювання такої інерційної ланки, як пакет пароперегрівача, не дозволяє здійснити швидкодіюче регулювання за одноконтурною схемою. Це обумовлює застосування двоконтурної схеми.

На регулятор 1-го впорскування надходить основний сигнал по температурі за ширмовим пароперегрівачем і випереджальний швидкісний по температурі пари за першим впорскуванням. На регулятор 2-го впорскування надходить основний сигнал по температурі на виході з котлоагрегату і швидкісний по температурі пари за другим впорскуванням. Внутрішній контур обох регуляторів містить у собі термopару за впорскуванням, диференціатор, регулятор, регулювальний орган, парooхолоджувач. Об'єктом регулювання внутрішнього контуру є парooхолоджувач і включена за ним термopара. Об'єкт має малі величини запізнювання і постійної часу, тому внутрішній контур може бути налаштований на максимальну швидкодію при обробці внутрішніх збурень. Зовнішній контур, що включає в собі інерційний об'єкт пароперегрівача, не може бути налаштований як швидкодіючий, без втрати стійкості. Цей контур налаштовується на підставі динамічних властивостей ділянки регулювання. Перевагою двоконтурною схеми регулювання є ліквідація швидкодіючим внутрішнім контуром усіх температурних збурень, що виходять із передвключених поверхонь нагріву.

На основі отриманих на Трипільській ТЕС експериментальних даних отримано передавальні функції інерційної та випереджаючої ділянок для навантажень 300 МВт та 225 МВт. В результаті маємо для ділянки за конвективним пароперегрівачем:

$$W_{in} = \frac{k_{in}}{(T_2^{in}s + 1)(T_1^{in}s + 1)} e^{-\tau_{in}s},$$

де $k_{in} = [0,89...1,37]$, $T_2^{in} = [32...48]$, $T_1^{in} = [16...24]$, $\tau_{in} = [14...24]$.

А для ділянки за впорском охолоджуючої води:

$$W_{e_{un}} = \frac{k_{e_{un}}}{T_{e_{un}}s + 1} e^{-\tau_{e_{un}}s},$$

де $k_{e_{un}} = [0,48 \dots 0,75]$, $T_{e_{un}} = [4 \dots 10]$, $\tau_{e_{un}} = [7 \dots 17]$.

Згідно з методикою налаштування регуляторів у каскадних схемах, внутрішній регулятор налаштовується на випереджаючий об'єкт. При цьому регулятор налаштовується на режим роботи при зниженому навантаженні.

Додатково до налаштування внутрішнього регулятора висуваються вимоги по максимальній швидкодії в каналі завдання-вихід і максимум функції чутливості – 1,6. Цим вимогам відповідає міра якості регулятора $\lambda/\tau=0,3$.

Для налаштування зовнішнього (коригуючого) регулятора необхідно внутрішній контур апроксимувати як еквівалентний об'єкт. В результаті отримуємо еквівалентний об'єкт, що описується передавальною функцією у вигляді аперіодичної ланки другого порядку:

$$W_{екв} = \frac{1,83}{750s^2 + 65s + 1} e^{-7s}.$$

При цьому похибка апроксимації не перевищує 3%.

Для забезпечення максимуму функції чутливості 1,6 міра якості коригуючого регулятора повинна становити 1,2.

Дотримуючись аналогічних вимог, які були вказані для регулятора з одним ступенем свободи, можна налаштувати регулятори з двома ступенями свободи. Тоді маємо наступні налаштування:

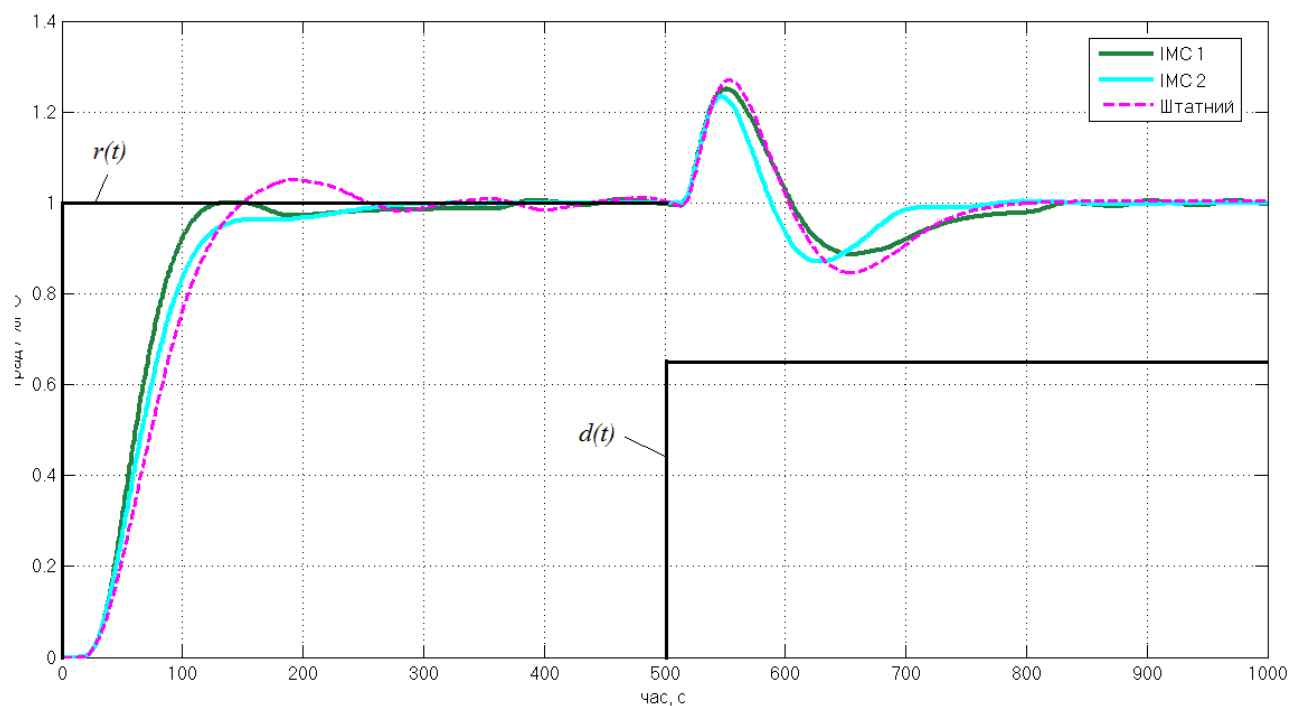
- стабілізуючий регулятор – 0,5;
- коригуючий регулятор: завдання – 1,2; збурення – 0,8.

Налаштування штатних регуляторів були отримані з Трипільської ТЕС:

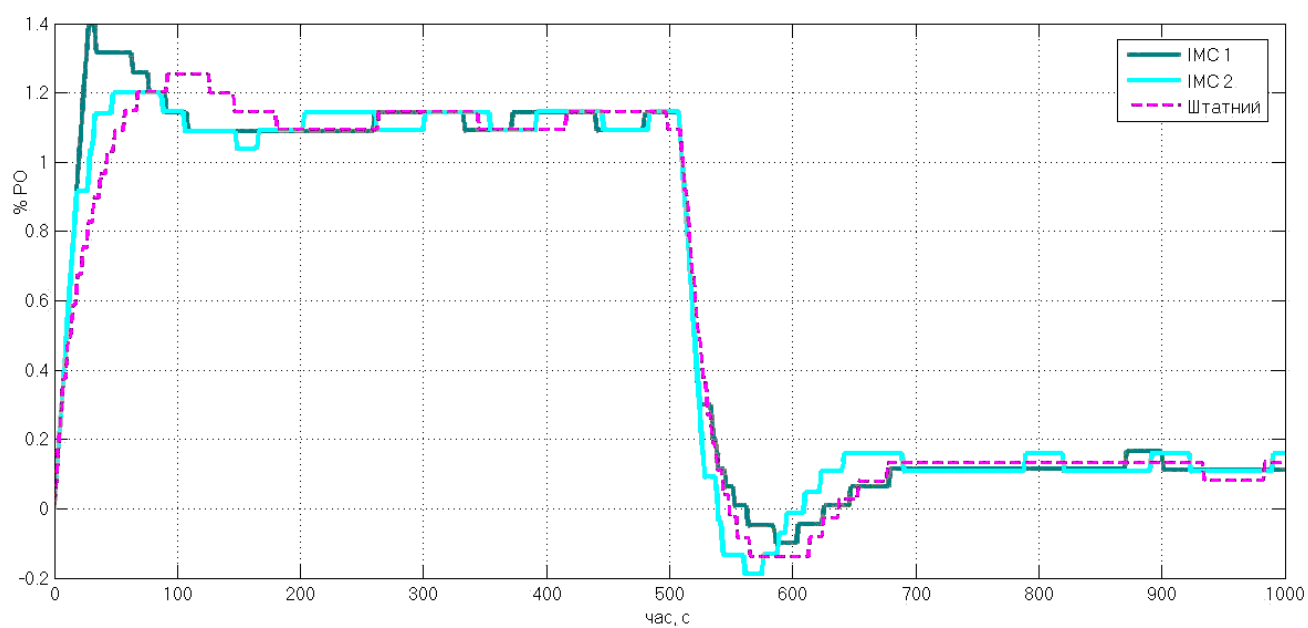
- стабілізуючий: $W_c(s) = 0,25 \left(1 + \frac{1}{2,59s} \right)$;
- коригуючий: $W_k(s) = 0,29 \left(1 + \frac{1}{40s} + \frac{3s+1}{s+1} \right)$.

Результати моделювання синтезованих систем наведено у вигляді перехідних процесів у режимі роботи максимального навантаження (Рис. 4.8) та

мінімального навантаження (Рис. 4.9). Показники якості функціонування систем зведено до Табл. 4.1 та Табл. 4.2.



а) вихідна величина



б) положення виконавчого механізму по каналу завдання

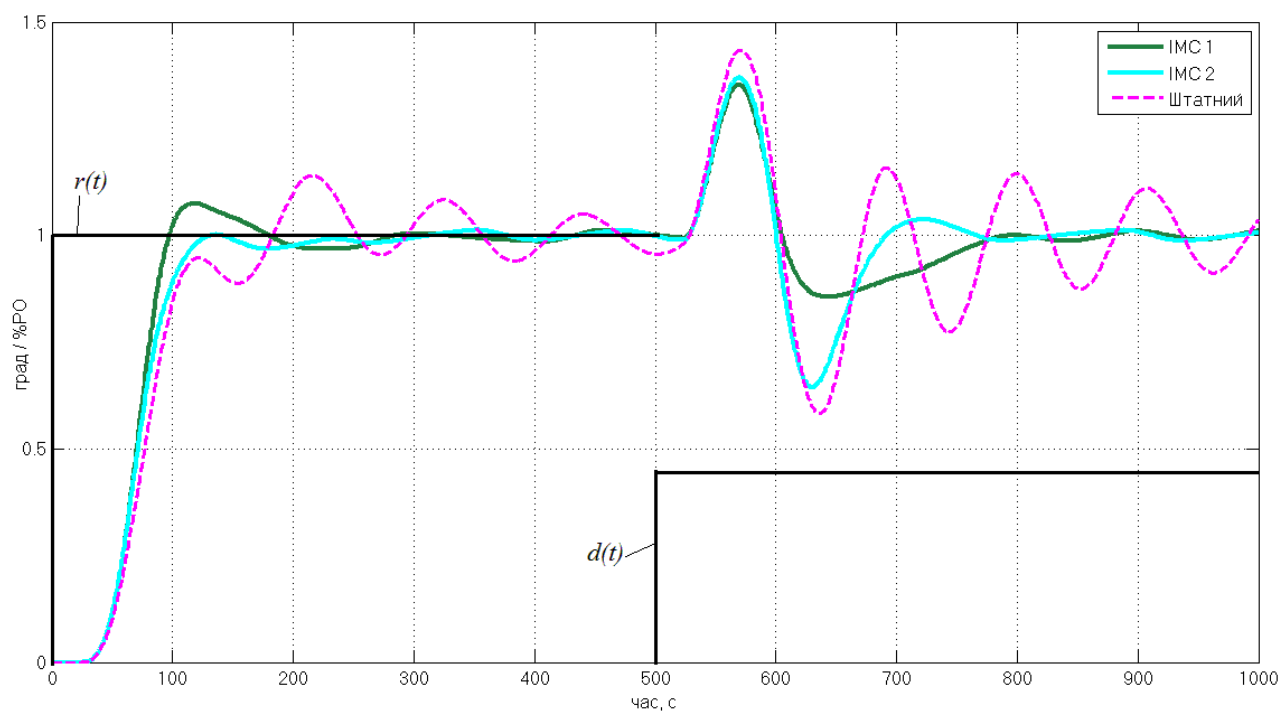
Рис. 4.8. Перехідні процеси у каскадній системі при максимальному навантаженні

Табл. 4.1. Показники якості перехідних процесів у системі при
максимальному навантаженні

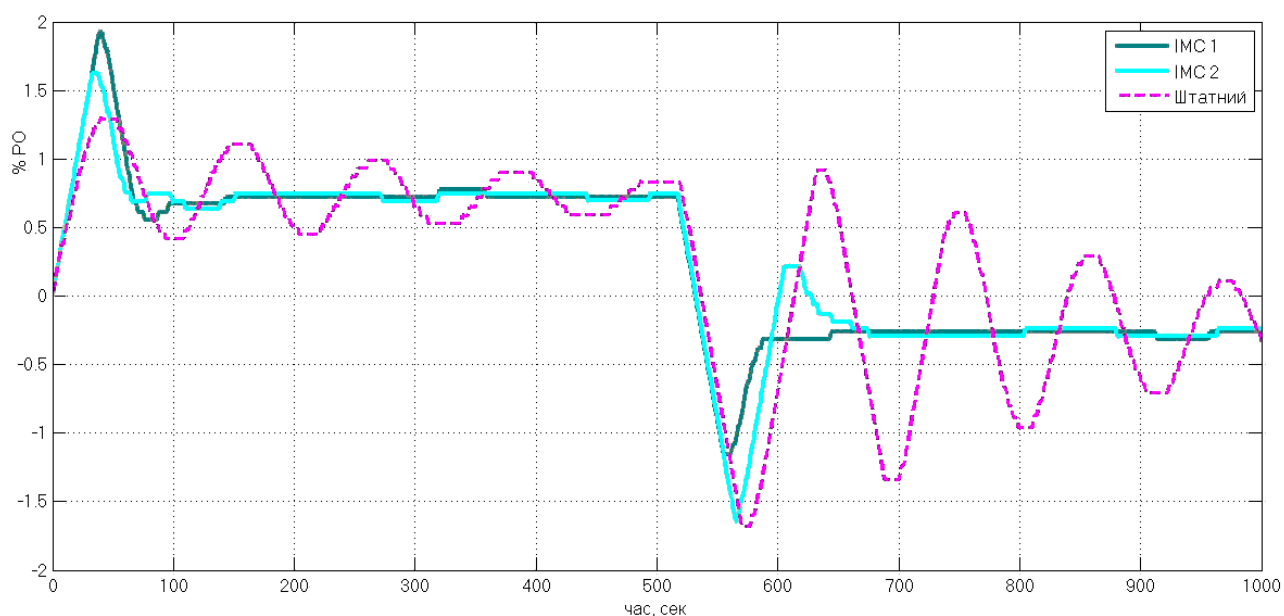
	Штатна система		IMC_1		IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
φ	100%	100%	100%	100%	100%	100%
σ	7%	56%	0	38%	0	50%
Δ	0,07	0,27	0	0,26	0	0,24
t_s	240	245	210	250	210	175
ISE	57,18	5,045	76,85	12,95	103,2	12,95
$ITSE$	1855	437,9	3700	1644	6693	1644
$ITAE$	3716	3109	8246	9862	13440	9862
M_s	1,59		1,44		1,44	
m	3,46		6,4		6,4	
β	59,4		61,2		61,2	

Табл. 4.2. Показники якості перехідних процесів у системі при
мінімальному навантаженні

	Штатна система		IMC_1		IMC_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
φ	60%	64%	100%	100%	100%	89%
σ	68%	32%	50%	40%	0	75%
Δ	0,14	0,44	0,08	0,35	0	0,36
t_s	515	670	245	256	185	240
ISE	67,91	8,908	86,54	15,01	111,4	15,01
$ITSE$	2707	1183	4466	2168	7386	2168
$ITAE$	9651	13280	10620	12350	14090	12350
M_s	1,6		1,58		1,58	
m	3,25		3,86		3,86	
β	53,5		58,0		58,0	



а) вихідна величина



б) положення виконавчого механізму по каналу завдання

Рис. 4.9. Перехідні процеси у каскадній системі в режимі роботи при мінімальному навантаженні

Для характеристики робастності розглянутих систем у Табл. 4.3 представлені відносні показники чутливості по основним параметрам якості функціонування.

Табл. 4.3. Відносні показники чутливості каскадних САР

	Штатна система		ІМС_1		ІМС_2	
	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід	Завдання-вихід	Збурення-вихід
φ	0,76	0,69	0,00	0,00	0,00	0,21
σ	16,42	0,81	-	0,08	-	0,97
Δ	1,89	1,19	-	0,65	-	0,94
t_s	2,16	3,28	0,31	0,05	0,22	0,70
<i>ISE</i>	0,35	1,45	0,24	0,30	0,15	0,30
<i>ITSE</i>	0,87	3,21	0,39	0,60	0,20	0,60
<i>ITAE</i>	3,02	6,18	0,54	0,48	0,09	0,48

Проаналізувавши дані можна зробити висновок про те, що каскадна система, налаштована стандартним методом є дуже чутливою до параметрів об'єкта і не дозволяє отримати якісні перехідні процеси при переході у режим роботи при зниженому навантаженні. При цьому автоматична система керування з регулятором з внутрішньою моделлю управління, побудованим на базі H_∞ -норми, по-перше, є робастною у вказаному діапазоні змін параметрів об'єкта за основними показниками якості (відносний коефіцієнт чутливості менше одиниці); по-друге, з таким регулятором досягається робастна якість керування за всіма показниками якості по обом каналам регулювання, зокрема, зменшення часу регулювання практично вдвічі та динамічного відхилення на 23% у порівнянні зі штатною системою; по-третє, застосування регулятора з двома степенями свободи дозволяє досягти кращих показників якості, хоча при цьому збільшується число включень виконавчого механізму.

Таким чином, використання регуляторів з внутрішньою моделлю дозволило отримати робастну систему на ділянці первинного перегріву пари у складі каскадної АСР. Це сприяє посиленню надійності роботи агрегатів енергоблоку та підвищенню енергоефективності внаслідок зменшення витрат охолоджувальної води на регулювання, що, в свою чергу, позитивно впливає на стан труб пароперегрівача та лопаток турбіни. Таким чином, збільшується термін служби металу поверхонь нагріву та скорочується тривалість простою при ремонтах та відновленні.

4.5. Економічна ефективність впровадження

Істотну частину загальної економії від впровадження модернізованих систем автоматичного керування енергоблоків, що працюють в широкому діапазоні зміни навантажень від 30 до 100% складає економія від підвищення надійності роботи технологічного обладнання [62]. Її основні складові частини наступні:

- економія за рахунок зміни ККД котельного агрегату і турбінної установки;
- економія від зміни терміну служби металу поверхонь нагріву водопарового тракту котла;
- економія від зміни величини запобігання шкоди від недовідпуску електроенергії споживачам;
- та паливний ефект від скорочення тривалості аварійного простою енергоблоку.

Економічний ефект від зміни ККД котельного агрегату, обумовлений модернізацією системи автоматизації процесу горіння. Використання зміни відносного ККД турбінної установки дозволяє врахувати зміну економічності турбінної установки, обумовлене відхиленням технологічних параметрів від їх заданих значень за рахунок різної якості не тільки динамічного, але й статичного налаштування відповідних САК енергоблоку [56].

Проведені дослідження показали [63], що навіть незначне відхилення фактичної температури металу від розрахункової призводить до суттєвого зменшення відносного часу до руйнування металу.

Модернізація систем автоматичного регулювання температури перегрітої первинної пари призводить до поліпшення умов роботи металу енергообладнання за рахунок зменшення рівня коливань і відхилень фактичних значень температур металу від розрахункових. В результаті підвищується довговічність поверхонь нагріву, яка визначається терміном служби до повної заміни.

Економія від зміни величини запобігання шкоди від недовідпуску електроенергії споживачам обумовлена підвищенням надійності роботи технологічного обладнання на ТЕС, що, у свою чергу, підвищує надійність електропостачання споживачів в енергосистемі.

Економія від зміни надійності роботи технологічного обладнання, відмова якого веде до зупинки блоку, обумовлена зміною витрат на вироблення електроенергії в енергосистемі і на ТЕС, де проведена модернізація САК, на відновлювальний ремонт, на пуски енергоблоку [64].

Складові економічного ефекту від впровадження системи автоматичного керування температури перегрітої пари Трипільської ТЕС енергоблоку 300 МВт розподілилися наступним чином:

- економія за рахунок зміни надійності роботи обладнання – 60%;
- економія за рахунок збільшення терміну служби металу поверхонь нагріву – 25%;
- економія від зменшення шкоди від аварійного недовідпуску електроенергії споживачам – 10%;
- економія за рахунок зменшення ремонтного простою – 5%.

4.6. Висновки до Розділу 4

1. Розроблена прикладна бібліотека функціональних блоків для контролерів компанії PhoenixContact дозволяє застосовувати регулятори із внутрішньою моделлю управління в реальних системах керування. Зручність, простота та інтуїтивна зрозумілість бібліотеки зменшує час розробки програмного забезпечення для контролерів систем керування. Принцип відкритості програмного коду забезпечує простоту при перенесенні розробленої бібліотеки на контролери інших виробників.
2. Удосконалено каскадну систему регулювання температури перегрітої пари шляхом використання у випереджаючому та інерційному контурах H_∞ -регуляторів. Їх застосування дозволило отримати робастну систему керування. Це сприяє покращенню якісних показників, посиленню

надійності роботи агрегатів енергоблоку та підвищенню енергоефективності внаслідок зменшення витрат охолоджувальної води на регулювання, позитивно впливає на стан труб пароперегрівача та лопаток турбіни, а, отже, уможлиблює збільшення міжремонтних інтервалів.

3. Установлено причини економічної ефективності впровадження систем з H_{∞} -ІМС-регулятором. Основними складовими економічного ефекту стали збільшення надійності роботи обладнання та збільшення терміну служби поверхонь нагріву.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РОБОТОЮ

У роботі вирішена наукова задача, суть якої полягає в удосконаленні систем автоматичного керування теплоенергетичними об'єктами шляхом застосування простих і водночас надійних робастних регуляторів з внутрішньою моделлю на основі H_∞ -норми замкненої системи.

- 1) Проведений аналіз проблем керування інерційними контурами водопарового тракту котла доводить доцільність використання для них структур регуляторів з внутрішньою моделлю на базі H_∞ -норми замкненої системи з огляду на те, що такий регулятор, орієнтуючись на "найгірший" режим роботи об'єкта, гарантує стійкість системи і приводить до показників якості функціонування не гірше заданих.
- 2) На основі отриманих експериментальних даних побудовано динамічні моделі інерційних контурів регулювання температурного режиму водопарового тракту у вигляді передавальних функцій, які враховують зміни параметрів об'єкта на всьому робочому діапазоні навантажень котлоагрегата.
- 3) Розроблено методику налаштування H_∞ -ІМС-регулятора для об'єктів зі змінними параметрами з одним та двома степенями свободи, яка уможливорює отримання робастної АСК з гарантуванням заданих, зручних для практики, показників якості функціонування системи.
- 4) Виявлено та формалізовано залежності основних показників якості від налаштувань H_∞ -ІМС-регулятора, на базі яких складено програму, що дозволяє отримати налаштування робастного регулятора, які задовольняють висунутим вимогам.
- 5) Установлено граничні межі змін параметрів об'єкта при яких система є робастною за заданим показником якості. Визначено, що система з H_∞ -ІМС-регулятором залишається робастною за основними показниками якості в діапазонах змін параметрів об'єкта не менше, ніж 50% від номінального.

- 6) Моделювання та порівняльний аналіз функціонування систем керування з різними регуляторами показали, що застосування методики налаштування регулятора з використанням внутрішньої моделі керування на базі H_∞ -норми в структурах системи керування температурою пари котлоагрегату суттєво поліпшує якість перехідних процесів, зокрема, зменшуються динамічне відхилення в середньому на 15% та час регулювання на 35%, до того ж виконавчий механізм виконує менше число включень, в середньому на 10%.
- 7) З огляду на підвищення надійності та економічності обладнання, H_∞ -ІМС-регулятори можуть бути застосовані і в інших контурах керування котлоагрегатів.
- 8) Виконана апаратно-технічна реалізація розробленої методики налаштування у вигляді програмних продуктів на базі промислових контролерів дозволяє забезпечити виконання вимог технологічного регламенту і полегшує процес експлуатації системи керування шляхом автоматизованого налаштування робастних регуляторів при змінних параметрах котлоагрегату.
- 9) Запропоновані рішення впроваджені у складі АСУТП Трипільської ТЕС на регуляторах температурного режиму, а також на лабораторному стенді кафедри АТЕП.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alfaro V.M. A single-parameter robust tuning approach for two-degree-of-freedom PID controllers [Текст] / V.M. Alfaro, R. Vilanova, O. Arrieta // European Control Conference (ECC09), Budapest, Hungary. – 2009. – P. 1788-1793.
2. Arrieta O. Simple PID tuning rules with guaranteed M_s robustness achievement [Текст] / O. Arrieta, R. Vilanova // 18th IFAC World Congress, Milano, Italy. – 2011. – P. 12042-12047.
3. Astrom K.J. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [Текст] / K.J. Astrom, C.C. Hang, B.C. Lim // IEEE Transactions on Automatic Control. – vol. 39, Issue 2. – Feb 1994. – P. 343 - 345.
4. Åström K.J. Advanced PID control [Текст] / K. J. Åström, T. Hägglund. – USA: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 2006. – 460 p.
5. Åström K.J. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margin [Текст] / K.J. Åström, T. Hägglund // Automatica. – №20. – 1984. – P. 645-651.
6. Astrom K.J. PID controllers: Theory, design, and tuning [Текст] / K.J. Astrom, T. Hagglund. – NC: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1995. – 461 p.
7. Braatz R.D. Internal model control. In The Control Handbook [Текст] / R.D. Braatz, W.S. Levine // Florida: CRC Press, Boca Raton. – 1995. – P. 215-224.
8. Brosilow C. B. The structure and design of Smith predictors from the viewpoint of inferential control [Текст] / C.B. Brosilow // Proc. of Joint Automatic Control Conf., Denver, CO. – 1979. – P. 288.
9. Brosilow C. Techniques of model-based control [Текст] / C. Brosilow, B. Joseph. – USA : Prentice Hall, 2002. – 704 p.

10. Chen D. PI/PID controller design based on direct synthesis and disturbance rejection [Текст] / D. Chen, D.E. Seborg // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 2002. – №41(19). – P. 4807-4822.
11. Dahlin E.G. Designing and tuning digital controllers [Текст] / E.G. Dahlin // Instrum. Control Syst. – 1968. – №41(6). P. 77-81.
12. Daniel E. Rivera. Internal model control: a comprehensive view [Текст] / Daniel E. Rivera – Department of Chemical, Bio and Materials Engineering College of Engineering and Applied Sciences Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999. – 23 p.
13. Foley M.W. A comparison of PID controller tuning methods [Текст] / M. W. Foley, R.H. Julien, B.R. Copeland. // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2005. – №4. – P. 712-722.
14. Foley M.W. Comparison of PI controller tuning methods [Текст] / M.W. Foley, N.R. Ramharack, B. R. Copeland. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2005. – №44 (17). – P. 6741-6750.
15. Grimble M.J. Robust industrial control. Optimal design approach for polynomial systems [Текст] / M.J. Grimble– Englewood Cliffs: Prentice-Hall International, 2006. – 698 p.
16. Hägglund T. Automatic tuning of PID controllers [Текст] / T. Hägglund, K.J. Åström // In: Levine, S. (ed.) The Control Handbook, CRC Press, Boca Raton. – 1996. – P. 817-826.
17. Hägglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols rules for PI control [Текст] / T. Hägglund, K.J. Åström // Asian J. Control. – 2002. – №4(4). – P. 364-380.
18. Horn I.G. Improved filter design in internal model control [Текст] / I.G. Horn, J.R. Arulandu, R.D. Braatz // Ind. Eng. Chem. Res. – №35(10). – 1996. – P. 3437–3441.
19. Johnson M.A. PID Control: new identification and design methods [Текст] / M.A. Johnson, M.H. Moradi. – London: Springer Science+Business Media, 2005. – 543 p.

20. Karakawa K. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay [Текст] / K. Karakawa, N. Abe, H. Ichihara // SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, vol. 3, 5-7 Aug. 2002. — P.1592-1595.
21. Kristiansson B. Robust tuning of PI and PID controllers [Текст] / B. Kristiansson, B. Lennartson // IEEE Control Syst. Mag. — №26(1). — 2006. — P. 69.
22. Laughlin D.L. Internal model control and process uncertainty: mapping uncertainty regions for SISO controller design [Текст] / D.L. Laughlin, K.G. Jordan and M. Morari // Int. J. Control. — №44. — 1986. — P. 1675-1698.
23. Lee W.S. Modified IMC-PID controllers and generalized PID controllers for first-order plus dead-time processes [Текст] / W.S. Lee, J. Shi // 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002, vol. 2, 2-5 Dec. 2002. — P. 898-903.
24. Leva A. On the IMC-based synthesis of the feedback block of ISA-PID regulators [Текст] / A. Leva, A.M. Colombo // Trans. Inst. Meas. Control. — 2004. — №26(5). P. 417-440.
25. Lin M.G. A comparative study of recent/popular PID tuning rules for stable, First-Order Plus Dead Time, Single-Input Single-Output processes [Текст] / M.G. Lin, S. Lakshminarayanan, G.P. Rangaiah. // Ind. Eng. Chem. Res. — 2008. — №47(2). — P. 344-368.
26. Mcfarlane D.C. Robust controller design using normalized coprime factorization description / D.C. Mcfarlane, K. Glover. — N.-Y.: Springer-Verlag, 1990. — 334 p.
27. Ming T. Internal model control [Текст] / T. Ming. — Newcastle: Chemical and Process Eng., 2002. — 357 p.
28. Morari M. Robust Process Control [Текст] / M. Morari, E. Zafiriou. — New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliffs, 1989. — 479 p.
29. Mosca E. H_∞ Control Theory / E. Mosca, L. Pandolfi. — London: British Library Cataloguing, 1991. — 325 p.

30. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3rd ed ICP [Текст] / A. O'Dwyer. – Ireland: Dublin Institute of Technology, 2009 – 624 p.
31. PID Control for Multivariable Processes. Lecture Notes in Control and Information Sciences [Текст] / Q.G. Wang, Z. Ye, W.J. Cai, C.C. Hang. – Berlin: Springer, 2008. – 249 p.
32. Rivera D.E. Internal model control 4: PID controller design [Текст] / D.E. Rivera, S. Skogestad, M. Morari // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 1986. – №25(1). – P. 252-265.
33. Shamsuzzoha M. IMC-PID controller design for improved disturbance rejection of time-delayed processes [Текст] / M. Shamsuzzoha, M. Lee // Ind Eng Chem Res. – №46(7). – 2007. – P. 2077–2091.
34. Shinskey F.G. Process control systems: application, design, and tuning. 4rd edn. [Текст] / F.G. Shinskey – New York: McGraw Hill, 1996. – 439 p.
35. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning [Текст] / S. Skogestad // J. Process Control. – 2003. – №13(4). – P. 291-309.
36. Taiwo O. Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning [Текст] / O. Taiwo // IEE Proc., Control Theory Appl. – 2006. – №140(5). – P. 323-327.
37. Tan W. Comparison of some well-known PID tuning formulas [Текст] / W. Tan, J. Liu, T. Chen, H.J. Marquez // Comput. Chem. Eng. – 2006. – №30(9). – P. 1416-1423.
38. Tao Liu. Industrial Process Identification and Control Design: Using a Step/Relay Test [Текст] / Tao Liu, Furong Gao // UK, London: Springer (in AIC series). – Ch. 7. – 2011. – P. 243-276.
39. Vilanova R. IMC based robust PID design: Tuning guidelines and automatic tuning [Текст] / R. Vilanova // Journal of Process Control. – №18(1). – 2008. – P. 61-70.

40. Visioli A. Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes [Текст] / A. Visioli // IEE Proc., Control Theory Appl. – 2001. – №148(2). P. 180-184.
41. Visioli A. Practical PID Control. Advances in Industrial Control Series [Текст] / A. Visioli – Berlin: Springer, 2006. – 294 p.
42. Youla D.C. Modern wiener-hopf design of optimal controllers – Part I. The Single Input-Output Case [Текст] / D.C. Youla, J. J. Bongiorno and H.A. Jabr // IEEE Trans. Autom. Control. – 1976. – P. 3-13.
43. Zames G. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses [Текст] / G. Zames // IEEE Trans. Auto. Control. – 1981. – Vol. AC-26. – № 2. – P. 301-320.
44. Zhang W. Quantitative process control theory [Текст] / W. Zhang. – Shanghai: Jiatong University, 2011. – 471 с.
45. Zhuang M. Automatic tuning of optimum PID controllers [Текст] / M. Zhuang, D.P. Atherton // IEE Proc. Part D. Control Theory Appl. – №140(3). – 1993. – P. 216-224.
46. Андронов А.А. Грубые системы [Текст] / А.А. Андронов, Л.С. Понтрягин. // Доклады Академии наук. – 1937. – том 14, №5. – С. 247–251.
47. Артюх С.Ф. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций [Текст] / С.Ф. Артюх, М.А. Дуэль, И.Г. Шелепов – Х.: Знание, 1998. – 324 с.
48. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 340 с.
49. Бунке О.С. Автоматизація процесів керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції з використанням методу динамічної корекції [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / О.С. Бунке – Київ, 2014. – 174 с.
50. Головка Д.Б. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: Підручник для інженерів та студентів вузів [Текст] / Д.Б. Головка, К.Г. Рего, Ю.О. Скрипник. – К.: Либідь, 1997. – 232 с.

51. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС [Текст] / В.А. Демченко. – Одесса : Астропринт, 2001. – 305 с.
52. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации [Текст] / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №2. – С. 90-98.
53. Денисенко В.В. Компьютерное управления технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия. Телеком, 2009. – 608 с.
54. Деякі напрямки заощадження енергоресурсів котельними агрегатами [Текст] / Л.І. Янко, Й.С. Мисак, М.О. Гут, Є.М. Якимів, Т.Ю. Кравець // Енергетика и электрификация. – 1999. – №9. – С. 9–12.
55. Дорф Р. Современные системы управления. Пер. с англ. Копылова Б.И. [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
56. Дуэль М.А. О технико-экономической эффективности АСУ энергоблоками [Текст] / М.А. Дуэль, Т.Л. Дуэль // Енергетика и электрификация. – 2001. – №1. – С. 21–28.
57. Егупов Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого, и адаптивного управления [Текст]: Учебник / Н.Д. Егупов – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 744 с, ил.
58. Еремин Е.Л. Адаптивное и робастное управление объектами теплоэнергетики [Текст] / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличко – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2009. – 228 с.
59. Ключев А.С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / А.С. Ключев, А.Г. Товарнов – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
60. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов [Текст] / М.А. Коновалов. – Київ: Феникс, 2009. – 312 с.

61. Кулаков Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: Учеб. пособие [Текст] / Г.Т. Кулаков. – Мн: УП «Технопринт», 2003 – 135с.
62. Кулаков Г.Т. Экспресс-методы расчёта параметров настройки АСР теплоэнергетических объектов [Текст] / Г.Т. Кулаков, Ю.В. Мелаек // Изв. вузов. Энергетика. – 1994. – №5–6. – С. 18-21.
63. Кулаков Г.Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть первая) [Текст] / Г.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, Ю.В. Макоско // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 5. – С. 92–97.
64. Кулаков Г.Т. Методика расчета экономической эффективности внедрения инновационных систем автоматического регулирования ТЭС (Часть вторая) [Текст] / Г.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, Ю.В. Макоско // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2013. – № 2. – С. 77–82.
65. Курдюков А.П. Синтез робастного H_∞ -регулятора для управления энергетической котельной установкой / А.П. Курдюков, В.Н. Тимин // Управление большими системами. – 2009. – № 25. – С. 179–214.
66. Куссуль Н.Н. Робастные методы оценивания и идентификации в условиях неопределенности [Текст]: дис. докт. техн. наук : 05.13.03 / Н.Н. Куссуль – Київ, 2001. – 348 с.
67. Липатников Г.А. Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики [Текст] / Г.А. Липатников, М.С. Гузеев. – Владивосток : ДВПИ им. Куйбышева, 2007. – 136 с.
68. Луцька Н.М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Н.М. Луцька – Київ, 2006. – 221 с.
69. Михеев М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

70. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования [Текст] : справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов: Под ред. А.С. Ключева – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
71. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування [Текст] / Ю.О. Остапенко. – К.: Задруга, 1999. – 420 с.
72. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций [Текст] / Г.П. Плетнёв – М. : Энергия, 1995. – 350 с.
73. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике [Текст] / Г.П. Плетнёв – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
74. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление [Текст] / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
75. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления [Текст] / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с., ил.
76. Робастные методы оценивания, идентификации и адаптивного управления [Текст] / В. Н.Азарсков, Л. Н. Блохин, Л. С. Житецкий, Н. Н. Куссуль. – Київ: Национальний авіаційний ун-т, 2004. – 498 с.
77. Ротач В.Я. Автоматизация настройки систем управления [Текст] / В.Я. Ротач, В. Ф. Кузищин, А. С. Ключев – М. : Энергоиздат, 1984. — 271 с.
78. Ротач В.Я. Автоматизированная настройка ПИД-регуляторов – экспертные и формальные методы [Текст] / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1995. – №10. – С. 9-16.

79. Ротач В.Я. Инженерные методы теории автоматического управления технологическими процессами [Текст] / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1991. – №9. – С. 12–16.
80. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами [Текст] / В.Я. Ротач – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
81. Серов, Е.П. Динамика парогенераторов [Текст] / Е.П. Серов, Б.П. Корольков. – М. : Энергоиздат, 1981. – 408 с.
82. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий [Текст] / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.
83. Тверской Ю.С. Локальные системы управления: Учеб.-метод.пособие [Текст] / Ю.С. Тверской. – ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – Иваново, 2011. – 128 с.
84. Тепловая энергетика – новые вызовы времени [Текст] / под общ. ред. П. Омеляновского, И. Мысака. – Львов: НВФ «Українські технології», 2010. – 690 с.
85. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения [Текст] / В.А. Хобин. – Одесса: "ТЭС", 2008. – 306 с.
86. Чермак И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии [Текст] / И. Чермак, В. Петерка, И. Заворка. – М. : Мир, 1972. – 624 с.
87. Широкий Д.К. Оптимальні настройки промислових систем регулювання [Текст] / Д.К. Широкий, О.Д. Куриленко. – Харків: Вища школа, 1975. – 264 с.
88. Баган Т.Г. Синтез грубої системи керування методом H_∞ / Т.Г. Баган, В.В. Орел // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: IX міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2011. – С. 21.
89. Баган Т.Г. Синтез робастного H_∞ -регулятора для керування АСУ розрідження / Т.Г. Баган, В.В. Орел // Сучасні проблеми наукового

- забезпечення енергетики: X міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : тези доп. – К., 2012. – С. 37.
90. Ковриго Ю.М. Математична модель синтезу робастного H_∞ -регулятора для систем керування теплоенергетичними об'єктами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Інформаційні технології і комп'ютерна інженерія. – Вінниця. – 2012. – № 2 (24). – С. 78-83.
 91. Ковриго Ю.М. Методика налаштування H_∞ -ПІД регулятора для об'єктів із запізнюванням [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – Київ. – 2013. – № 1. – С. 27-33.
 92. Баган Т.Г. Налаштування робастного регулятора з внутрішньою моделлю / Т.Г. Баган, А.Л. Ущатовський // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : XI міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ.: тези доп. – К., 2013. – С. 12.
 93. Ковриго Ю.М. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ- та ПІД-регуляторів [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, О.С. Бунке // Східно-європейський журнал передових технологій – Харків. – 2013. – Том 3 № 3 (63). – С. 58-63.
 94. Баган Т.Г. H_∞ -регулятор з внутрішньою моделлю управління / Т.Г. Баган // Автоматика-2013 : 20-а Міжнародна конференція з автоматичного управління, присвячена 100-річчю з дня народження академіка О.Г. Івахненка : тези доп. – Миколаїв, 2013. – С. 44-45.
 95. Ковриго Ю.М. Обеспечение робастности в АСУ теплоэнергетическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.С. Бунке // Теплоэнергетика – Москва. – 2014. – № 3. – С. 9-14.
 96. Ковриго Ю.М. Проектування систем керування з регулятором на базі внутрішньої моделі з двома ступенями свободи [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.Л. Ущатовський // Східно-європейський журнал передових технологій – Харків. – 2014. – Том 4 № 11 (70). – С. 4-8.
 97. Баган Т.Г. Синтез робастного регулятора з двома ступенями свободи для мінімізації функції чутливості системи керування / Т.Г. Баган, А.Л.

- Ущатовський // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : XII міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ.: тези доп. – К., 2014. – С. 129.
98. Ковриго Ю.М. Способи покращення якості для робастних систем з регулятором з внутрішньою моделлю управління / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Автоматика-2014: Міжнародна конференція з автоматичного управління, присвячена 100-річчю з дня народження академіка НАНУ О.І. Кухтенка : тези доп. – Київ, 2014. – С.114-115.
99. Ковриго Ю.М. Синтез робастного регулятора для об'єктів с изменяющимися параметрами [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Доклады БГУИР: Мінськ, 2015. – № 2 (88). – С.168-171.
100. Баган Т.Г. Модифікація регулятора з внутрішньою моделлю / Т.Г. Баган, А.Л. Ущатовський // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : XIII міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ.: тези доп. – К., 2015. – С. 24.
101. Баган Т.Г. Досягнення робастної якості для об'єктів зі змінними параметрами / Т.Г. Баган // Автоматика-2015: Міжнародна конференція з автоматичного управління: тези доп. – Одеса, 2015. – С.38-39.

ДОДАТОК А

Затверджую
Заступник головного
інженера з реконструкції Тп ТЕС
А.Б. Попутніков



ПРОТОКОЛ НАРАДИ

**Про впровадження рішень з автоматизації прямооточного
котлоагрегату з на базі ІМС-алгоритмів та динамічних коректорів на
Трипільській ТЕС**

07.02.2014 р.

м. Українка

Присутні:

Від Трипільської ТЕС:

заступник головного інженера з реконструкції Попутніков А.Б, старший майстер дільниці автоматики ЦТАВ Кривецький Д.Ю.

Від кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів НТУУ «КПІ»:

завідувач кафедри, к.т.н., професор Ковриго Ю.М., старший викладач. Баган Т.Г., аспірант Бунке О.С.

Слухали:

- Аспірант кафедри АТЕП, Бунке О.С., старший викладач кафедри АТЕП Баган Т.Г.:
Використання ІМС-регулятора та контура динамічної корекції дає одночасне підвищення швидкодії та стійкості АСР за рахунок використання двоканальної схеми формування керуючого впливу, швидкодія регулятора забезпечують виробленням форсуючого керуючого сигналу першим каналом, а для забезпечення стійкості системи керування, із заданим запізнюванням, вводиться компенсаційний сигнал другого каналу, який корегує сигнал першого каналу.
- Заступник головного інженера з реконструкції Попутніков А.Б, старший майстер дільниці автоматики ЦТАВ Кривецький Д.Ю.:
Запропоноване рішення було впроваджено в контурі регулювання температурним режимом пароводяного тракту енергоблоку №2 Трипільської ТЕС, динамічний викид регульованої змінної в перехідних режимах зменшився на 15%, загальне переміщення виконавчих органів

при використанні коректора зменшилося на 10%, це сприяє подовженню терміну експлуатації обладнання. Система керування зберігає задану стійкість при зміні навантаження у межах 220-300 МВт, помітно зменшилась коливальність перехідних процесів.

Вирішили:

Розробка пройшла випробування в системі регулювання температурним режимом пароводяного тракту прямоточного котлоагрегату ТПП-210А енергоблоку №2 та прийнята для експлуатації.

Розглянуті рішення щодо застосування ІМС-алгоритмів та динамічного коректора є доцільними для впровадження у підсистеми автоматичного регулювання інерційних контурів енергоблоку. Дані рішення можливо застосовувати на регуляторах температурного режиму, теплового навантаження, температури первинної пари, та інших інерційних контурів регулювання.

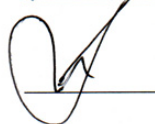
Від Трипільської ТЕС:

Заступник головного інженера

з реконструкції Тп ТЕС

Старший майстер

дільниці автоматики ЦТАВ

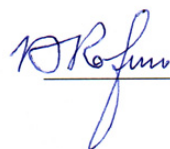
А.Б. Попутніков

Д.Ю. Кривецький

Від НТУУ «КП»:

Завідувач кафедри АТЕП НТУУ «КП»,

к.т.н., проф.



Ю.М. Ковриго

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан ТЕФ НТУУ «КПІ»

Письменний С.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Президент ТОВ «РАУТ-автоматік»

Присяжников В.Д.

2014 р.

АКТ

про впровадження лабораторного стенду «АСУ залежної системи опалення на базі контролера Waterheat-S1»

Комісія в складі:

від "ЗАМОВНИКА": президент ТОВ «РАУТ-автоматік» Присяжников В.Д., директор департаменту з розробки програмних засобів Чаус О.В., директор департаменту з розробки технічних засобів Бойченко М.О.

від "ВИКОНАВЦЯ": завідувач кафедри АТЕП НТУУ "КПІ" Ковриго Ю.М., доцент Батюк С.Г., старший викладач Баган Т.Г., магістрант Лосіка В.М.

Розглянула роботу лабораторного стенду, що використовує:

1. Імітаційне SIL-модельювання АТК промислового теплопункту.
2. Контролер Waterheat-S1, налаштований як ІМС-регулятор з використанням H_∞ -норми замкненої системи.

По результатам перевірки ухвалила:

- 1) Імітаційне моделювання промислового теплопункту з використанням моделі в Simulink робить можливою роботу з нею не тільки в реальному, але й в миттєвому моделюванні з використанням всього дослідницького арсеналу СКМ Matlab. Це надає можливість проведення різнобічної аналітичної роботи для вивчення промислового теплопункту у якості ТОВ.
- 2) Контролер забезпечує показники якості системи, встановлені технічними вимогами, при наявності зовнішніх збурень, а також при зміні параметрів моделі об'єкту на $\pm 50\%$ від номінальних.
- 3) Даний стенд доцільно використовувати в навчальному процесі при вивченні та дослідженні систем опалення та гарячого теплопостачання.

від "ЗАМОВНИКА"

Чаус О.В.

Бойченко М.О.

від "ВИКОНАВЦЯ"

Ковриго Ю.М.

Батюк С.Г.

Баган Т.Г.

Лосік В.М.