

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Удосконалення систем керування потужністю енергоблоків вітчизняних
теплоелектростанцій
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕА-А23мг
спеціальності : 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(код і найменування спеціальності)

_____/ Ігор РЕШЕТНЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент _____/ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Нормоконтроль _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)
Секретар ЕК _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

Факультет/ННІ Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістерського рівня вищої освіти

студенту _____ (ці) _____ Ігор _____ РЕШЕТНЯК

(ім'я, прізвище)

1. Тема роботи Удосконалення систем керування потужністю енергоблоків вітчизняних теплоелектростанцій

затверджена наказом по академії 4801-5/3345 від "12" жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи "30" листопада 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Визначення функцій розрахунку параметрів налаштування ПІ-регулятора з передвімкненим диференціатором, розрахунок параметрів налаштування схеми з передвключеним диференціатором та побудова розширеної КЧХ розімкнутої системи; розрахунок КРТ з передвімкненим диференціатором у складі САКП бл. 9 Курахівської ТЕС за допомогою Mathcad та бл.3 Запорізької ТЕС.

4. Зміст роботи (перелік питань, що їх належить розробити). 1) Вступ; 2) Огляд автоматичних систем керування потужністю на енергоблоках; 3) Схеми систем автоматичного керування потужністю/тиском; 4) Дослідження систем автоматичного керування потужністю; 5) Експериментальні дослідження АСР інтегруючих об'єктів; 5) Висновки; 7) Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал) . 1) Схема САКП з передвімкненим диференціатором на КРТ; 2) Імітаційна модель САКП з провідною турбіною та передувімкненим диференціатором на КРТ; 3) Запорізька ТЕС, бл. 3. Випробування САКП. Ступінчасте обурення $\Delta N_{зд} = -16$

МВт (5%); 4) Запорізька ТЕС, бл. 3. Випробування САКП. Ступінчасте обурення $\Delta N_{зд} = -32$ МВт (10%); 5) Запорізька ТЕС, бл. 3. Графік зміни технологічних параметрів у САКП за 8 годин.

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання “_12_” жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Геннадій КАНЮК
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Ігор РЕШЕТНЯК
(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Вступ	Жовтень	Виконано
2	Огляд автоматичних систем керування потужністю на енергоблоках	Жовтень	Виконано
3	Схеми систем автоматичного керування потужністю/тиском	Жовтень	Виконано
4	Дослідження систем автоматичного керування потужністю	Листопад	Виконано
5	Експериментальні дослідження АСР інтегруючих об'єктів	Листопад	Виконано
6	Висновки і оформлення дипломної роботи	Листопад	Виконано

Студентка

(підпис)

Ігор РЕШЕТНЯК
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Євген КЛЮЧКА
(ім'я, прізвище)

Удосконалення систем керування потужністю енергоблоків вітчизняних теплоелектростанцій

Кваліфікаційна робота складається з 85 сторінок тексту, 5 аркушів креслень формату А1 та 38 джерел літератури.

У даній роботі досліджується питання удосконалення систем автоматичного керування потужністю (САКП) енергоблоків вітчизняних теплоелектростанцій.

Доведено, що для підтримання заданого навантаження енергоблока при збереженні заданої якості регулювання тиску пари перед турбіною найбільш ефективною по сукупності показників якості є схема з провідною турбіною та передвключеним диференціатором на котельному регуляторі тиску з розрахунком її параметрів налаштування відповідно до запропонованої методики.

Рекомендується застосування схеми САКП з котельним ПП-регулятором тиску пари з передвімкненим диференціатором та незалежним турбінним ПП-регулятором потужності та запропонованим методом розрахунку параметрів налаштування. Практика проектування, налагодження та експлуатації підтвердила ефективність зазначених схем.

Ключові слова: регулятор, диференціатор, система автоматизованого керування потужністю, енергоблок.

Ihor RESHETNIAK

Improvement of power control systems of power units of domestic thermal power plants

The qualification work consists of __85__ pages of text, __5__ sheets of drawings in A1 format and __38__ literature sources.

This work examines the issue of improving automatic power control systems (APCS) of power units of domestic thermal power plants.

It has been proven that to maintain the specified load of the power unit while maintaining the specified quality of steam pressure regulation in front of the turbine, the scheme with a leading turbine and a pre-activated differentiator on the boiler pressure regulator with the calculation of its setting parameters according to the proposed methodology is the most effective in terms of quality indicators.

It is recommended to use the APCS scheme with a boiler PI-regulator of steam pressure with a pre-activated differentiator and an independent turbine PI-power regulator and the proposed method of calculating the setting parameters. The practice of design, debugging and operation has confirmed the effectiveness of these schemes.

Keywords: regulator, differentiator, automated power control system, power unit.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ НА ЕНЕРГОБЛОКАХ	12
1.1. Регулювання частоти мережі як задача автоматичного управління	12
1.2. Регулювання навантаження енергоблоків	16
РОЗДІЛ 2 СХЕМИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ / ТИСКОМ	23
2.1. Координована схема САКП із форсуючими сигналами	23
2.2. Схема САКП з турбінним регулятором потужності та передувімкненим диференціатором на котельному регуляторі тиску	27
2.3. Розрахунок параметрів налаштування АСР з ПІ-регулятором та передувімкненим диференціатором	29
3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ	36
3.1. Комплексні частотні характеристики та області заданого згасання в САКП енергоблока із прямоточним котлом	36
3.2. Моделювання процесів регулювання в САКП енергоблоку з прямоточним котлом	41
3.3. Перехідні процеси в САКП із прямоточним котлом	45
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСР ІНТЕГРУЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ	53
4.1. Експериментальні дослідження АСР інтегруючих об'єктів з ПІ-регулятором та передувімкненим диференціатором	53

4.2. Експериментальне дослідження САКП енергоблока з барабанним пиловугільним котлом №9 225 МВт Курахівської ТЕС	55
4.2.1. Технологічний об'єкт керування, вимоги до САКП	55
4.2.2. Визначення динамічних характеристик об'єкта та розрахунок параметрів КРТ	56
4.2.3. Графіки процесів регулювання та їх аналіз	64
4.3. Впровадження САКП енергоблока з прямоточним пиловугільним котлом ст. №3 325 МВт Запорізької ТЕС	68
4.3.1. Технологічний об'єкт управління, вимоги до САКП	68
4.3.2. Визначення динамічних характеристик об'єкта та розрахунок параметрів КРТ	69
4.3.3. Графіки процесів регулювання та їх аналіз	73
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	77
ДОДАТКИ	82

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ОЕС – об'єднана енергосистема
ТЕС – теплова електрична станція
АСР - автоматична система регулювання
САКП - система автоматичного керування потужністю
ТРП - турбінний регулятор потужності
КРТ - котельний регулятор тиску
НПРЧ - нормоване первинне регулювання частоти
ЗПРЧ - загальне первинне регулювання частоти
ЛАСР – локальні автоматичні системи регулювання
ТРТ - турбінний регулятор тиску
КРП - котельний регулятор потужності
КЧХ – комплексні частотні характеристики
ОЗЗ – область заданого затухання

ВСТУП

Серед багатьох об'єктів регулювання в теплоенергетиці, як і в інших галузях промисловості, можна виділити особливий клас об'єктів - об'єктів з інтегруючою складовою у передавальній функції їхньої моделі. При дії ступінчастого збурення на такий об'єкт зміна регульованої величини з часом не припиняється, не «вирівнюється» на якомусь новому встановленому значенні. Тому такі об'єкти часто називають об'єктами «без самовирівнювання». Можна виділити два типи таких об'єктів: природні – рівні рідини в баках, регульовані витратою подачі або зливу рідини в/з них, та еквівалентні об'єкти, одержувані за рахунок зворотних зв'язків у багатозв'язкових автоматичних системах регулювання (АСР).

При певній побудові багатозв'язкової системи автоматичного керування потужністю (САКП) енергоблока, коли небаланс по потужності усувається швидкодіючим турбінним регулятором потужності (ТРП), а за тиском гострої пари – котельним регулятором тиску (КРТ), об'єкт для КРТ теж стає об'єктом без самовирівнювання. Така схема САКП дозволяє досягти високої якості регулювання, її дослідження представляє значний інтерес при сучасних вимогах до систем керування енергоблоків, що беруть участь у регулюванні частоти та потужності енергосистеми [1-2].

На сьогодні проведено багато досліджень з реалізації багатозв'язкових систем керування потужністю енергоблоку. Більшість впроваджених схем САКП енергоблоків із прямоточними котлами побудовано так, щоб уникнути появи в них еквівалентних об'єктів, що інтегрують. В теж час, у літературі важко зустріти публікації з вивчення динамічних властивостей САКП, побудованої за схемою з незалежними ТРП та КРТ, у якій виникає еквівалентний об'єкт без самовирівнювання, методів розрахунку параметрів її налаштування, особливо для прямоточних котлів, і, тим більше, їх промислового впровадження.

Мета роботи – удосконалення систем керування потужністю енергоблоків вітчизняних електростанцій за рахунок підвищення їх точності шляхом вивчення динамічних властивостей різних схем регулювання, їх порівняльного аналізу, уточнення методів розрахунку параметрів налаштування та експериментального дослідження отриманих результатів.

Згідно з поставленою метою були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Провести огляд схем систем автоматичного керування потужністю (САКП) енергоблоків, що застосовуються.

2. Проаналізувати застосування схеми САКП із котельним ПП-регулятором тиску пари з передвімкненим диференціатором та незалежним турбінним ПП-регулятором потужності (схеми з ведучою турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ).

2. Провести оцінку методу розрахунку параметрів налаштування схеми САКП з передвключеним диференціатором на КРТ.

3. Виконати порівняльний аналіз якості процесів регулювання у різних схемах САКП при їх налаштуванні за однаковими критеріями та при однакових обмежень.

4. Розглянути експериментальне дослідження САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ на електростанціях України.

Об’єкт дослідження - ефективність систем автоматичного керування потужністю енергоблоків теплоелектростанцій.

Предмет дослідження – системи автоматичного керування потужністю (САКП) енергоблоків.

Методи дослідження - в основу роботи покладено порівняльний аналіз динамічних властивостей різних схем САКП, налаштованих за однаковими критеріями якості та з урахуванням однакових обмежень, аналіз та оцінка їх ефективності; розрахунки за допомогою програмного пакету Mathcad.

Наукова новизна - проведено аналіз динамічних властивостей САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ у частотній та тимчасовій областях та доведено переваги даної схеми при використанні розробленого методу розрахунку параметрів її налаштувань.

Практичне значення результатів:

- розглянуто імітаційну модель САКП енергоблока з прямоточним котлом;

- на підставі проаналізованих методів розрахунку параметрів налаштування САКП з ТРП та передвімкненим диференціатором на КРТ запропоновано відповідні алгоритми з використанням програмного пакету Mathcad, з урахуванням особливостей зняття динамічних характеристик на енергоблоках з барабанними та прямоточними котлами;

- доведено ефективність схеми САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ для прямоточних пиловугільних енергоблоків при використанні розробленого методу розрахунку параметрів її налаштування;

- проаналізовано експериментальне дослідження на електростанціях САКП з ТРТ та передвключеним диференціатором на КРТ із використанням запропонованих методів налаштування з оцінкою їх ефективності.

Для точного підтримання заданого навантаження енергоблоку при збереженні заданої якості регулювання тиску пари перед турбіною найбільш ефективною є схема САКП із незалежним швидкодіючим турбінним ПІ-регулятором потужності та котельним регулятором тиску пари, що складається з ПІ-регулятора та попередньо включеного диференціатора, налаштованого за спеціальною методикою для цього типу об'єктів.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ НА ЕНЕРГОБЛОКАХ

1.1. Регулювання частоти мережі як задача автоматичного управління

Регулювання частоти є складною задачею автоматичного управління режимом в будь-якому енергооб'єднанні. Відхилення частоти понад нормовані значення можуть призвести до важких аварійних ситуацій, каскадних відключень і розвалювання ОЕС України з досить тяжкими технічними та економічними наслідками.

Дослідженню питань регулювання частоти в енергетичних системах присвячено багато наукових робіт. Так, в [3-6] розглядались питання моделювання процесу зміни частоти в мережі, застосування та вдосконалення засобів автоматичного регулювання частоти і т.п. Сьогодні особливо важливим і актуальним стає питання дослідження регулювання частоти та потужності в ОЕС України з урахуванням сучасних умов роботи енергосистеми та реального технічного стану наявного обладнання.

Регулювання частоти в енергосистемі є однією з найважливіших задач керування режимами, оскільки безпосередньо впливає на умови забезпечення стабільної та надійної роботи енергосистеми.

При регулюванні частоти важливим є забезпечення нормативних умов щодо якості електричної енергії, які для ОЕС України регламентуються [1, 7] і для частоти електричного струму в електричних мережах встановлюють такі межі:

- 1) для систем, які синхронно приєднані до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} + 4 \%$ (- 6 %) протягом 100 % часу;
- 2) для систем без синхронного приєднання до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$ протягом 100 % часу.

В процесі роботи енергетичної системи відбуваються відхилення частоти від номінального значення як в нормальних режимах в результаті постійного впливу нерегулярних коливань навантаження і тимчасових порушень балансу потужності, так і в аварійних режимах в результаті впливу великих за величиною збурень, що призводять до значних змін загального балансу потужності.

Регулювання частоти і потужності в енергосистемі має виконувати функцію відновлення балансу потужності та стабілізувати її частоту. В більшості сучасних енергосистем світу задача регулювання частоти підрозділяється на три взаємопов'язані автоматичні і оперативні завдання: первинне, вторинне та третинне регулювання.

Первинне регулювання частоти забезпечує стабільність частоти, тобто утримання відхилень частоти в допустимих межах при порушенні загального балансу потужності в будь-якій частині об'єднання і за будь-якої причини. Первинне регулювання розпочинається протягом декількох секунд як спільна дія всіх учасників паралельної роботи і здійснюється за допомогою автоматичного регулювання швидкості обертання турбіни.

Вторинне регулювання частоти забезпечує відновлення номінального рівня частоти та оперативне або автоматичне регулювання планових режимів обміну заданої потужності між енергосистемами з корекцією по частоті (сальдо зовнішніх перетоків). Вторинне регулювання вводиться в дію централізовано в області регулювання протягом декількох десятків секунд, вивільняє первинне регулювання. Здійснюється вторинне регулювання за допомогою зміни потужності енергоблоків, які беруть участь у автоматичному регулюванні частоти в межах заданого вторинного резерву.

Третинне регулювання частоти забезпечує постійну ефективність дії первинного і вторинного регулювання частоти завдяки оперативній корекції режимів роботи ОЕС в порядку надання взаємодопомоги або здійснення оптимізації їх режимів роботи із постійної наявності первинних та вторинних резервів. Третинне регулювання вводиться в дію в області регулювання і

вивільняє вторинне регулювання централізованим переплануванням генерації або зовнішніх перетоків чи споживання. Третинне регулювання здійснюється за допомогою швидкого пуску або зупинки агрегатів маневрених гідроелектростанцій (ГЕС) та теплових електростанцій (ТЕС) для оперативного коригування режиму.

В разі необхідності в енергосистемі передбачено регулювання часу для виправлення глобальних відхилень синхронного часу від астрономічного за тривалий період роботи системи регулювання частоти та потужності, які виникають і накопичуються в результаті неточності і дискретності вимірювання фактичної частоти, похибки в регулюванні середньої частоти в системах вторинного регулювання. Регулювання часу являє собою корекцію уставки по частоті, яка усуває помилку синхронного часу, що викликає відхилення фактичних значень обмінів електроенергією та потужністю від планових договірних значень.

Функціональна схема системи регулювання частоти та потужності в енергосистемі, яка передбачає сполучення зазначених видів регулювання [1], показана на рис. 1.1. Заходи з регулювання частоти і потужності здійснюються на різних послідовних етапах, кожний з яких має різні характеристики та якості. Ці заходи є взаємозалежними і передбачають введення одного замість іншого та застосування для цього засобів автоматики. Співвідношення цих процесів у часі на прикладі виникнення дефіциту активної потужності і зниження частоти умовно показано на рис. 1.2.

У разі відсутності регулювання частоти в енергосистемі при виникненні збурення та порушенні балансу активної потужності величина відхилення частоти досягне величини $\Delta f_{бр}$. Характер процесу зміни частоти в часі буде відповідати залежності 1 на рис. 1.2.

Залежно від структури, наявності маневрених резервів потужностей, які можуть бути задіяні у вторинному та третинному регулюванні частоти, а також особливостей функціонування енергосистем вимоги щодо регулювання частоти і потужності в сучасних системах досить різні [1].

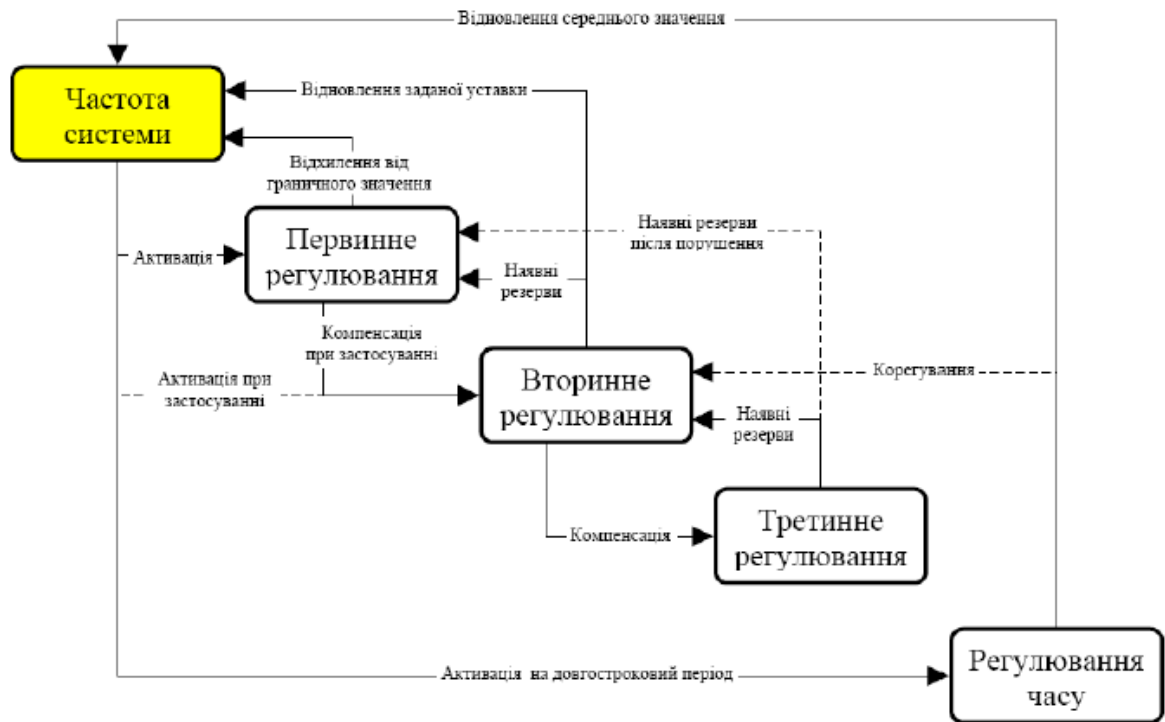


Рис. 1.1. Функціональна схема системи регулювання частоти та потужності в енергосистемі

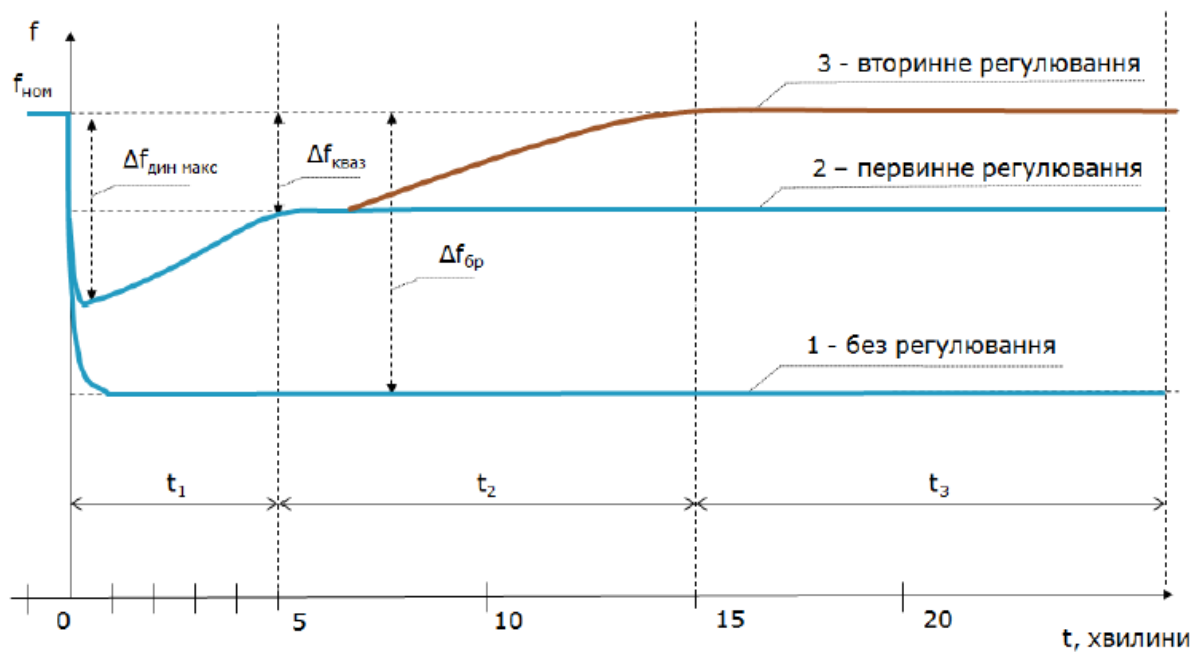


Рис. 1.2. Процес регулювання частоти

1.2. Регулювання навантаження енергоблоків

Сучасні вимоги передбачають високу точність регулювання навантаження енергоблоків [1], [2]. Наприклад, активна потужність енергоблока, що бере участь у нормованому первинному регулюванні частоти (НПРЧ), має підтримуватися з точністю 1% від номінальної. При цьому має зберігатися якість регулювання інших технологічних параметрів енергоблока, таких, наприклад, як тиск гострої пари перед турбіною.

Для аналізу систем автоматичного керування потужністю енергоблока (САКП) їх можна розглянути у вигляді двозв'язних АСР потужності/тиску [8-14], відносячи всі, зокрема підлеглі локальні АСР (ЛАСР) технологічних параметрів енергоблока до об'єкта управління. При цьому він має два регульовані параметри, на які впливають два регульовальні впливи. Регульованими параметрами такого об'єкта є активна потужність генератора N та тиск гострої пари перед турбіною P'_t , а регульовальними впливами – узагальнене завдання положення клапанів парової турбіни H_t та завдання навантаження котла F , яким для барабанних та газомазутних прямохідних котлів зазвичай є завдання витрат палива, а для пиловугільних прямохідних котлів – завдання щодо витрати поживної води.

Енергоблоки можуть працювати в режимі номінального тиску пари перед турбіною, ковзного тиску або в комбінованих режимах [14-17]. У сучасних САКП режим ковзного тиску або комбінований режим забезпечуються зміною завдання тиску $P_{зд}$ залежно від зміни заданої потужності $N_{зд}$. Таким чином, з точки зору дослідження динамічних властивостей енергоблока як двозв'язкового об'єкта регулювання, режим ковзного тиску відрізняється від режиму номінального тиску тільки наявністю завдання $P_{зд}$, що змінюється, і в аналітичному дослідженні в рамках цієї роботи не розглядається. Водночас у наведених результатах експериментальних досліджень (див. розділ 4), присутні САКП енергоблоків, що працюють у такому режимі.

Об'єкт регулювання P'_t і N при зміні навантаження котла F характеризується великою інерцією, яка визначається динамікою котла.

Постійні часу об'єкта цими каналами досягають кількох хвилин. Динаміка об'єкту регулювання при збуренні клапанами турбіни H_T має суттєво меншу інерцію – постійні часу початкових ділянок перехідних характеристик, що визначають налаштування регуляторів, становлять лише кілька секунд.

Як відомо, регулятори для малоінерційних об'єктів (називаються часто швидкодіючими регуляторами) характеризуються високою точністю підтримки параметрів. До цього класу відносяться АСР витрати або тиску газу, витрати поживної води, витрати повітря, розрідження в топці та ін [18].

Турбінний регулятор, що впливає на регулюючі клапани турбіни, також є малоінерційним, а враховуючи застосування сучасних виконавчих механізмів у гідравлічній частині регулювання турбін – електромеханічних або електрогідравлічних перетворювачів, час повного ходу яких обчислюється десятими частками секунди, характеристики турбінних регуляторів взагалі близькі до ідеальних. Тому якщо тиск пари підтримуватиметься турбінним регулятором тиску (ТРТ) «до себе», а потужність блоку - котельним регулятором потужності (КРП) (таку схему називають «схемою з провідним котлом», рис. 1.3 а), то відхилення тиску P'_T заданого $P_{зд}$ будуть мінімальними і обурення, що діють на нього, будуть відпрацьовуватись досить швидко. При цьому регулювання потужності N буде відбуватися в темпі котла, з урахуванням його інерції i , отже, відхилення по цим параметром від $N_{зд}$ будуть більшими в порівнянні з відхиленнями тиску (рис. 1.3 в).

У «зворотній» схемі – «схемі з провідною турбіною» (рис. 1.3 б), де тиск пари перед турбіною P'_T підтримується котельним регулятором тиску (КРТ), а потужність N – турбінним регулятором потужності (ТРП), виникає протилежна ситуація: вдається швидко та точно підтримувати N та значно гірше P'_T (рис. 1.3 г). Причому якість підтримки P'_T у такій схемі значно нижче якості підтримки N у схемі з провідним котлом (рис. 1.3 а) при однакових збуреннях (рис. 1.3 в, г) через втрату у цій схемі об'єктом регулювання КРТ самовирівнювання.

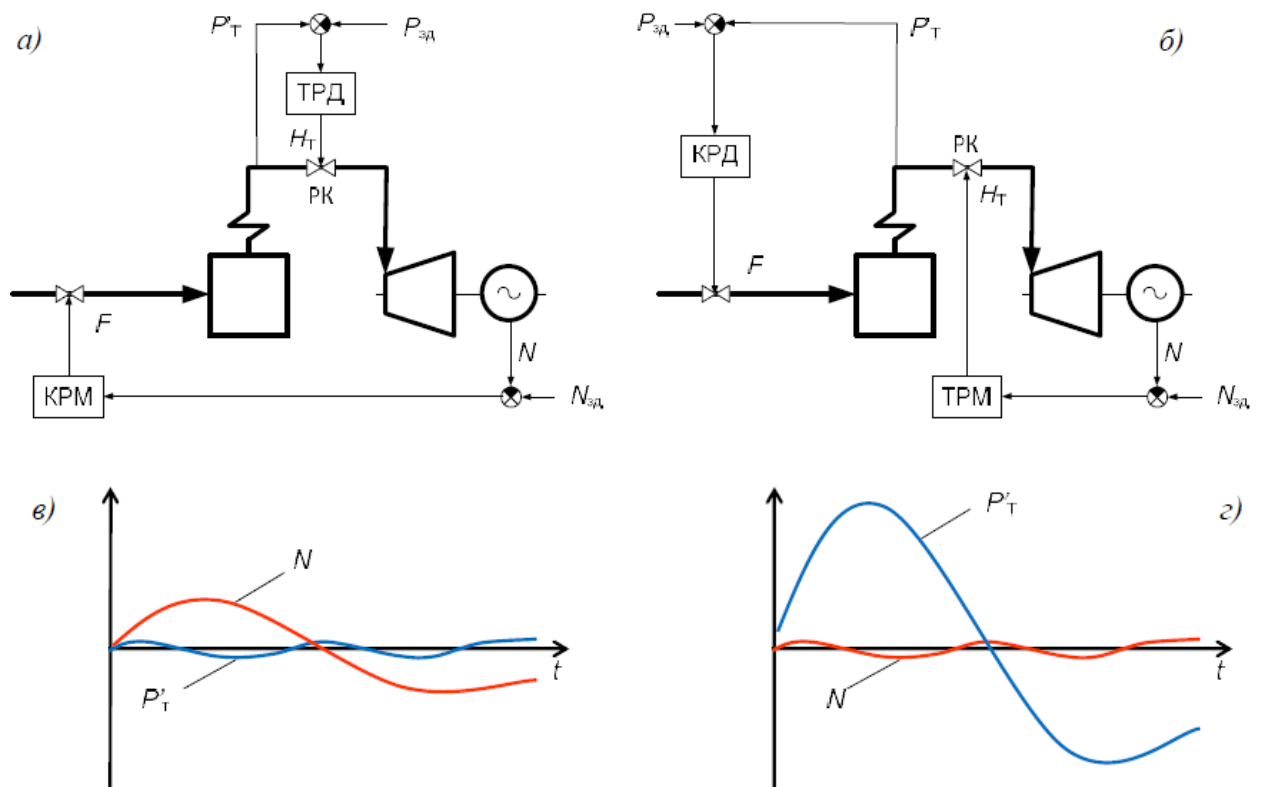


Рис. 1.3. Структурні схеми АСР потужності/тиску тиску пари: з провідним котлом (а) та з провідною турбіною (б). Якість підтримки потужності N та тиску пари P'_T при побудові АСР за схемою з провідним котлом (в) та по схемою з провідною турбіною (г)

На рис. 1.4 показані схеми САКП у вигляді структурних ланок із сигналами параметрів у приростах.

На схемах прийнято такі позначення регульованих параметрів:

- y_N – збільшення потужності N ;
- y_P – збільшення тиску гострої пари P'_T ;

регулювальних впливів:

- μ_F – збільшення завдання навантаження котла F (завдання витрати палива або витрати поживної води);
- μ_H – збільшення положення регулювальних клапанів парової турбіни;

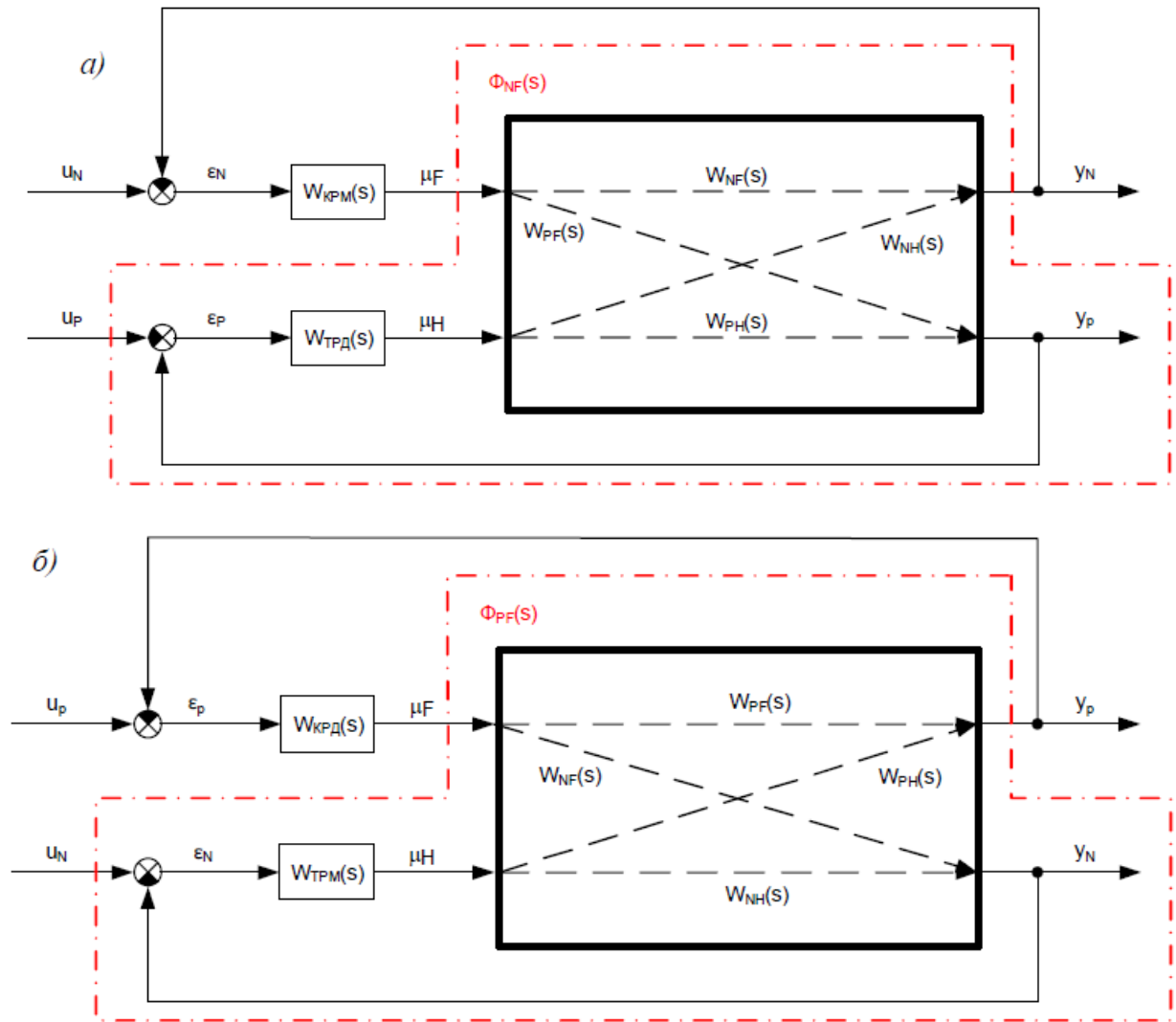


Рис.1.4. Схеми САКП як структурних ланок:

а) схема з провідним котлом; б) схема з провідною турбіною

та передавальних функцій:

- $W_{NF(s)}$ – передатна функція об'єкта по каналу $\mu_F \rightarrow y_N$;
- $W_{PF(s)}$ – передатна функція об'єкта по каналу $\mu_F \rightarrow y_P$;
- $W_{NH(s)}$ – передатна функція об'єкта по каналу $\mu_H \rightarrow y_N$;
- $W_{PH(s)}$ – передатна функція об'єкта по каналу $\mu_H \rightarrow y_P$;
- $W_{KPM(D)(s)}$ – передатна функція котельного ПІ-регулятора потужності (тиску);
- $W_{TPM(D)(s)}$ – передатна функція турбінного ПІ-регулятора потужності (тиску).

Для котельного регулятора потужності КРП у схемі на рис. 1.4 а еквівалентним об'єктом є замкнута система через турбінний регулятор тиску ТРТ каналом $\mu_F \rightarrow y_N$. Її передатна функція:

$$\Phi_{NF}(s) = W_{NF}(s) + W_{PF}(s)W_{NH}(s) \frac{W_{TPD}(s)}{1-W_{PH}(s)W_{TPD}(s)} \quad (1.1)$$

Для котельного регулятора тиску КРТ у схемі на рис. 2 б еквівалентним об'єктом є замкнута система через турбінний регулятор потужності ТРП каналом $\mu_F \rightarrow u_P$. Її передатна функція:

$$\Phi_{PF}(s) = W_{PF}(s) - W_{NF}(s)W_{PH}(s) \frac{W_{TPM}(s)}{1+W_{NH}(s)W_{TPM}(s)} \quad (1.2)$$

Розглянемо КЧХ цих еквівалентних об'єктів за частоти $\omega \rightarrow 0$, відповідного статичного режиму (рис. 14а). Як зазначалося вище, $W_{NH}(s)$ носить зникає, тобто $W_{NH}(0) = 0$. Тому еквівалентному об'єкту (15) відповідає:

$$\Phi_{NF}(0) = W_{NF}(0) = 5.2 \quad (1.3)$$

а еквівалентному об'єкту:

$$\Phi_{PF}(0) = W_{PF}(0) - W_{NF}(0)W_{PH}(0)W_{TPM}(0) = 0.47 + 5.2 \cdot 0.2 \cdot k_{p,TPM} \left(1 + \frac{1}{0 \cdot T_{и,TPM}} \right) = \infty, \quad (1.4)$$

де $k_{p,TPM}$ і $T_{и,TPM}$ – параметри налаштування ТРП, з чого випливає, що об'єкт (1.1) являє собою об'єкт із самовирівнюванням, регульована величина для КРП u_N при обуренні μ_F в кінці процесу переходить на нове значення, а об'єкт (1.2) є об'єктом без самовирівнювання.

Фізично інтегруючі властивості об'єкта (1.2) пояснюються наступним чином. У схемі рис. 1.3 б (і рис. 1.4 б) кількість енергії N , що видається турбогенератором, так само як і споживаної від котла у вигляді ентальпії пари перед турбіною, що підтримується на постійному рівні ТРП. У статиці навантаження котла та турбіни рівні. Але якщо цей енергетичний баланс порушити, змінивши μ_F , то надлишок або нестача енергії, що виробляється

котлом, але не споживається (або переспоживається) турбіною, що перебуває під впливом регулятора потужності з постійним завданням, висловиться в безперервній зміні ентальпії пари (накопичення або витрати потенційної енергії) у вигляді зміни тиску u_p . Цей еквівалентний об'єкт можна порівняти з рівнем рідини в баку, де роль витрат рідини/пари із бака виконую задане навантаження котла та активна потужність, що виробляється турбогенератором, а роль рівня – тиск пари перед турбіною.

На рис. 1.5 а показані КЧХ еквівалентних об'єктів (1.1) для КРП у схемі на Рис. 1.4 а (пунктиром) та (1.2) для КРД у схемі на рис. 1.4 б, але в рис. 1.5 б - відповідні сфери запасу стійкості ПІ-регуляторів. Для об'єкту без самовирівнювання (1.2) (суцільні лінії) справедливі міркування для об'єктів регулювання рівня рідини.

Через два І-складники в розімкнутій системі (в об'єкті та в ПІ-регуляторі) область запасу стійкості для КРТ у схемою рис. 2 б значно менше області запасу стійкості для КРП у схемі на рис. 1.4 а.

Еквівалентний об'єкт для КРП у схемі 2 а являє собою «класичний» об'єкт із самовирівнюванням, якому відповідає велика область запасу стійкості, проте ця схема не відповідає вимогам якості підтримки N , яка у разі відбувається у темпі котла (рис. 1.3 в). Схема 2 б, навпаки, забезпечує необхідну якість регулювання N , але еквівалентний об'єкт для КРТ у ній є об'єктом без самовирівнювання. Ця схема має дуже малу область запасу стійкості по u_p , і найчастіше (особливо для прямоточних котлів) якість підтримки тиску гострої пари в ній виявляється неприйнятним (рис. 1.3 г). Тому в сучасних умовах обидві схеми в «чистому» вигляді не застосовуються, поступаючись місцем координованим схемам САКП, описаним нижче.

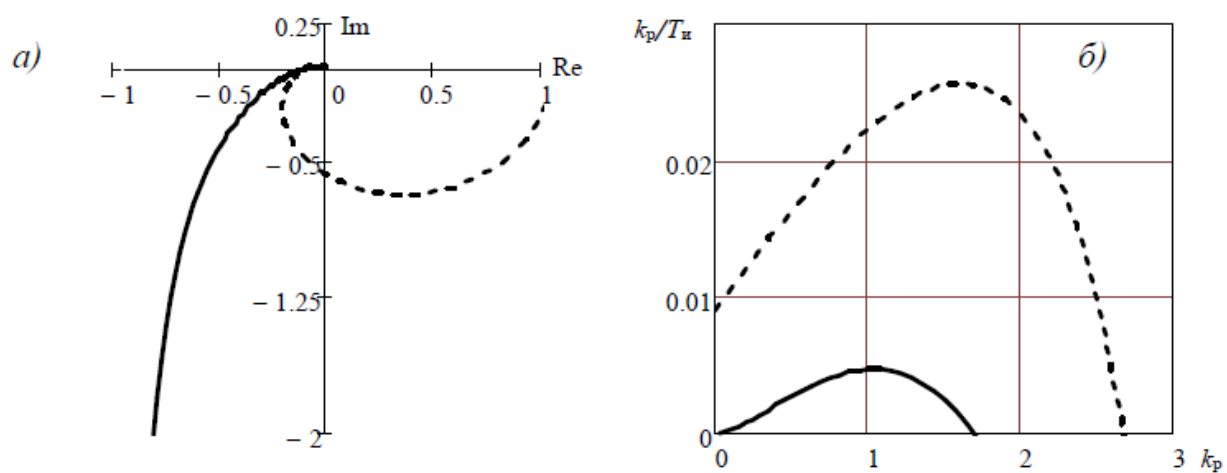


Рис. 1.5. а) КЧХ еквівалентних об'єктів для КРТ (суцільна) та КРП (пунктир),
 б) межі запасу стійкості ПІ-регуляторів: КРТ (суцільна) та КРП (пунктир)

РОЗДІЛ 2 СХЕМИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ / ТИСКОМ

2.1. Координована схема САУП із форсуючими сигналами

В даний час найбільшого поширення набули комбіновані (координовані) схеми САКП, у яких досягнення необхідної якості регулювання на турбінний регулятор заводяться обидва небалансу: і по u_N , і по u_P з різними ваговими коефіцієнтами. Крім того, крім самих небалансів, і на котельний, і турбінний регулятори подаються форсуючі впливи при зміні завдання навантаження енергоблоку.

Застосовувані схеми САКП, переважно, різняться величиною вагових коефіцієнтів при небалансах, формою форсуючих впливів, а також точкою їх застосування: на входах регуляторів або безпосередньо на регулюючих органах μ_F та μ_H [19-23].

Розглянемо у спрощеному вигляді одну з таких схем (рис. 2.1), що набула широкого поширення в даний час на пострадянському просторі [19].

Доповнення в турбінному регуляторі стосовно схеми, зображеної на рис. 12а показані синім кольором.

Для забезпечення необхідної якості регулювання активної потужності енергоблоку на турбінний регулятор (умовно званий ТРП) надходить не тільки небаланс по тиску ε_P , а й помилка регулювання за навантаженням ε_{NT} , при цьому ε_P надходить на ТРП з деяким коефіцієнтом $0 < \alpha < 1$. Сигнал помилки регулювання ε_{NT} є різницею між заданим навантаженням енергоблоку для ТРП u_{NT} , та поточним навантаженням u_N .

Задане навантаження надходить у ТРП і КРП двома каналами: каналу сумарної зміни заданої потужності енергоблоку, що відповідає завданням вторинного та третинного регулювання (з урахуванням дії обмежувачів темпу завдання) $u^{B,T}_N$, і каналу зміни заданої потужності енергоблоку по каналу первинного регулювання частоти, що формується коректором частоти u^{Π}_N .

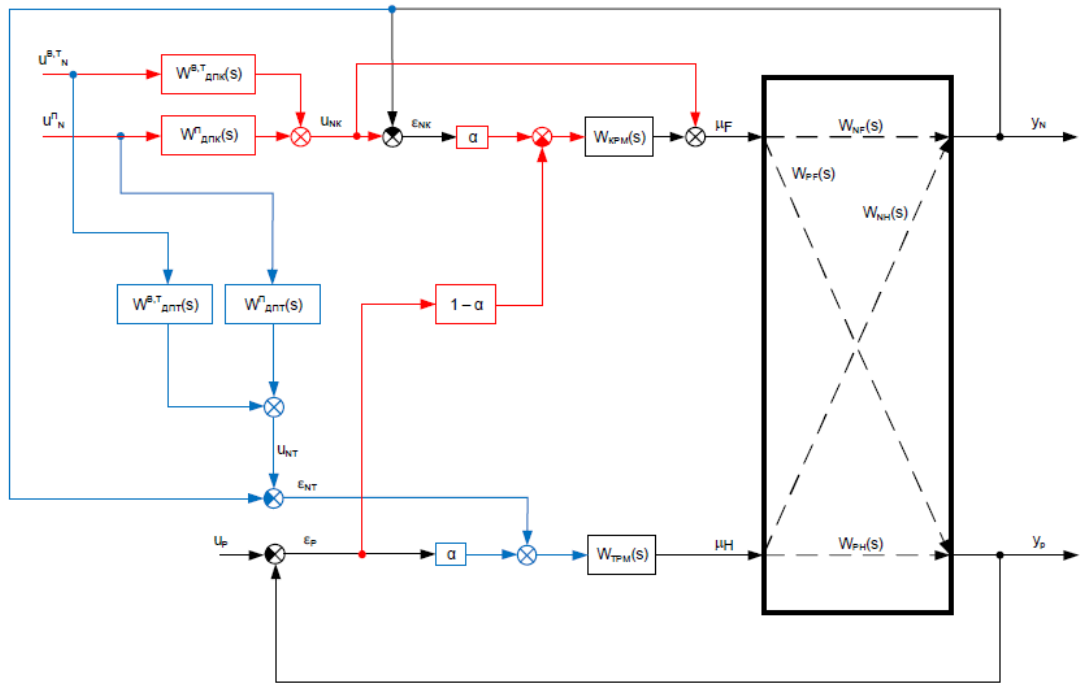


Рис. 2.1. Координована схема САКП як структурних ланок

(на схемі не показано: обмежувачі темпу завдання каналами третинного та вторинного регулювання потужності, облік технологічних обмежень, блок формування Рзд для режиму ковзного тиску та комбінованого режиму, блок формування сигналу небалансу положення клапанів турбіни, регулятор частоти обертання турбіни)

Сигнал $u_{НТ}$ являє собою суму форсованих сигналів, сформованих у відповідних динамічних перетворювачах $W^{B,T}_{ДПТ}(s)$ та $W^П_{ДПТ}(s)$. Як правило, передавальні функції $W^{B,T}_{ДПТ}(s)$ та $W^П_{ДПТ}(s)$ представляють собою суму прямого (статичного) та форсуючого каналів у вигляді складного диференціатора з коефіцієнтом $k^{B,T(П)}_{ДПТ}$, постійного часу $T^{B,T(П)}_{ДПТ}$ та порядком $n^{B,T(П)}_{ДПТ}$ ⁵:

$$W^{B,T(П)}_{ДПТ}(s) = 1 + k^{B,T(П)}_{ДПТ} \left[1 - \frac{1}{(1 + T^{B,T(П)}_{ДПТ} s)^{n^{B,T(П)}_{ДПТ}}} \right] \quad (2.1)$$

Спочатку розглянемо сигнали, що надходять на турбінний регулятор при статичних $u^{B,T}_N$ та $u^П_N$, коли виходи складних диференціаторів у динамічних перетворювачах $W^{B,T}_{ДПТ}(s)$ та $W^П_{ДПТ}(s)$, що описуються (2.1), нульовий, і сигнал $u_{НТ}$ дорівнює сумі $u^{B,T}_N + u^П_N$. В основному, обурення по

навантаженню, не пов'язані зі зміною завдань $u^{B,T}_N$ та u^{Π}_N , виникають з боку котла (зміни якості палива, режиму горіння, складу працюючого технологічного обладнання та пр.). При дії таких збурень починає змінюватися ентальпія гострої пари, що виробляється котлом, характеризується його тиском P^t , і пропорційно, навантаження енергоблока N (з деякою інерцією щодо P^t). З урахуванням того, що сигнали по тиску та потужності включені до ТРП з різними знаками, а також з урахуванням переведення цих параметрів з фізичних величин у відносні сигнали ε_{NT} і ε_P при цьому рівні за модулем і протилежні за знаком. При значенні $\alpha = \alpha_{inh}$, рівному відношенню коефіцієнта передачі об'єкта по каналу $\mu_F \rightarrow u_N$ до коефіцієнту передачі об'єкта каналом $\mu_F \rightarrow u_P$, турбінний регулятор інваріантний до всіх збурень з боку котла (автономність II-го типу) [25-33]. При цьому усунення небалансу, що виникає, по u_N проводиться тільки котлом, що, як зазначалося вище, з урахуванням його великої інерції, як правило, неприйнятне з погляду необхідної якості регулювання u_N . При зниженні $\alpha < \alpha_{inh}$, компенсація ε_{NT} та ε_P стає неповною – чим менше α , тим більше «вага» небалансу за потужністю в загальному сигналі, що надходить на ТРП, та швидкодіючий турбінний регулятор все більше залучається до регулювання навантаження - якість її підтримки зростає (одночасно зниженням якості регулювання тиску). Зрештою, при $\alpha = 0$ турбінний регулятор перетворюється на «чистий» регулятор потужності, регулювання u_N відбувається з малою інерційністю, а регулювання u_P здійснюється тільки казаном з великою інерційністю (як у схемі 1.4 б). При цьому об'єкт котельного регулятора стає об'єктом без самовирівнювання. При налагодженні параметр α підбирається так, щоб досягти необхідної якості підтримки u_N при дії котельних обурень та зберегти при цьому прийнятну якість підтримки u_P .

Складні диференціатори у складі $W^{B,T}_{ДПТ(s)}$ та $W^{\Pi}_{ДПТ(s)}$, що описуються (2.1), забезпечують необхідну якість регулювання навантаження u_N при зміні її завдань $u^{B,T}_N$ та u^{Π}_N . Їх налаштування підбираються так, щоб при дії різних каналів, що впливають на сумарну зміну потужності енергоблоку,

перерегулювання за положенням регулюючих клапанів турбіни μ_N забезпечувало додаткову зміну потужності за рахунок акумулюючої можливості котла.

Доповнення у схемі рис. 2.1 стосовно схеми рис. 1.4 а в частині котельного регулятора (умовно званого КРП) показані червоним кольором.

Як і для турбінного регулятора сигнали зміни завдань за потужністю енергоблоку $u^{B,T}_N$ та u^{Π}_N проходять через окремі динамічні перетворювачі у вигляді суми статичного каналу та складного диференціатора з коефіцієнтом $k_{\text{ДПК}}$, постійного часу $T_{\text{ДПК}}$ та порядком $n_{\text{ДПК}}$:

$$W_{\text{ДПК}}^{B,T(\Pi)}(s) = 1 + k_{\text{ДПК}}^{B,T(\Pi)} \left[1 - \frac{1}{(1 + T_{\text{ДПК}}^{B,T(\Pi)} s)^{n_{\text{ДПК}}^{B,T(\Pi)}}} \right] \quad (2.2)$$

Їх параметри, що визначають величину та тривалість форсування завдання за потужністю при зміні $u^{B,T}_N$ або u^{Π}_N , налаштовуються так, щоб сумарна зміна потужності, виробленої котлом за час перехідного процесу при зміні $u^{B,T}_N$ або u^{Π}_N , покривало не тільки кінцеве приріст Δu_N у встановленому режимі, але й додаткова зміна потужності за рахунок акумулюючої здатності котла в початковий період (збереження енергетичного балансу) [14], [17].

Крім того, для збільшення швидкості реакції котельного регулятора сформований в динамічному перетворювачі $W_{\text{ДПК}}(s)$ сигнал $u_{\text{НК}}$ подається не тільки на вхід КРП, а й безпосередньо на його регулюючий орган μ_F . При цьому проводиться масштабування та зсув цього сигналу відповідно до статичною характеристикою «навантаження котла – потужність енергоблока», яка, як правило, нелінійна (на рис. 2.1 не показано).

Сигнал помилки регулювання $\varepsilon_{\text{НК}}$, сформований як різниця між сумою заданих (з урахуванням форсування) $u^{B,T}_N$ та u^{Π}_N та поточним u_N навантаженням блоку, подається в КРП з тим самим коефіцієнтом α , з яким надходить у ТРП сигнал помилки ε_r . На КРП також надходить сигнал P з

коефіцієнтом $(1 - \alpha)$. Таким чином, при збільшенні α «вага» сигналу небалансу за потужністю в КРП ε_{NK} зростає, а сигналу небалансу тиску ε_p – знижується. Т. е. функція підтримки навантаження більше покладається на котел, а тиску – на турбіну. При зниженні α , навпаки, турбіна активніше залучається до регулювання навантаження u_N , а котел – регулювання тиску u_p . При $\alpha = 0$ схема рис. 2.1 перетворюється на «чисту» схему САКП з провідною турбіною рис. 1.4 б.

2.2 Схема САКП з турбінним регулятором потужності та передувімкненим диференціатором на котельному регуляторі тиску

Еквівалентний об'єкт (1.2) для КРТ у схемі рис. 1.4 б є об'єктом без самовирівнювання. Як і для природних інтегруючих об'єктів, таких як рівень рідини в баку, одним із способів компенсації шкідливого впливу І-складової об'єкта є введення Д-складової в алгоритм регулювання. Виходячи з цього, доцільно розглянути застосування схеми САКП, що зображена на рис. 2.2 [34].

Ця схема відрізняється від схеми на рис. 1.4 б наявністю передвімкненого реального диференціатора $W_{d(s)}$ на сигналі u_p (показано синім кольором), і щодо КРТ вона повністю ідентична схемою. Для швидкодіючого турбінного регулятора ТРП жодних додаткових пристроїв не передбачається.

Однією з варіацій такої схеми є схема «САУМ-2» [35-36]. У ній на КРТ поряд із сигналом по похідній u_p для додаткового форсування при зміні завдання по потужності заводиться сигнал похідної u_N . У 70-х роках минулого сторіччя проводилися впровадження цієї схеми на енергоблоках, як з барабанними, так і з прямоточними котлами. Однак, якісної всережимної роботи САКП-2 на енергоблоки з прямоточними котлами досягти тоді не вдалося [37]. Незважаючи на те, що було передбачено застосування Д-складової $W_{d(s)}$ по регульованого параметра u_p в КРТ, при налагодженні САКП-2 на кількох таких енергоблоках не було досягнуто заданих

(допустимих) показників по відхиленню y_p і коливання системи. Тому до недавнього часу для таких об'єктів схема САКП з «чистим» регулятором потужності на турбіні не застосовувалася.

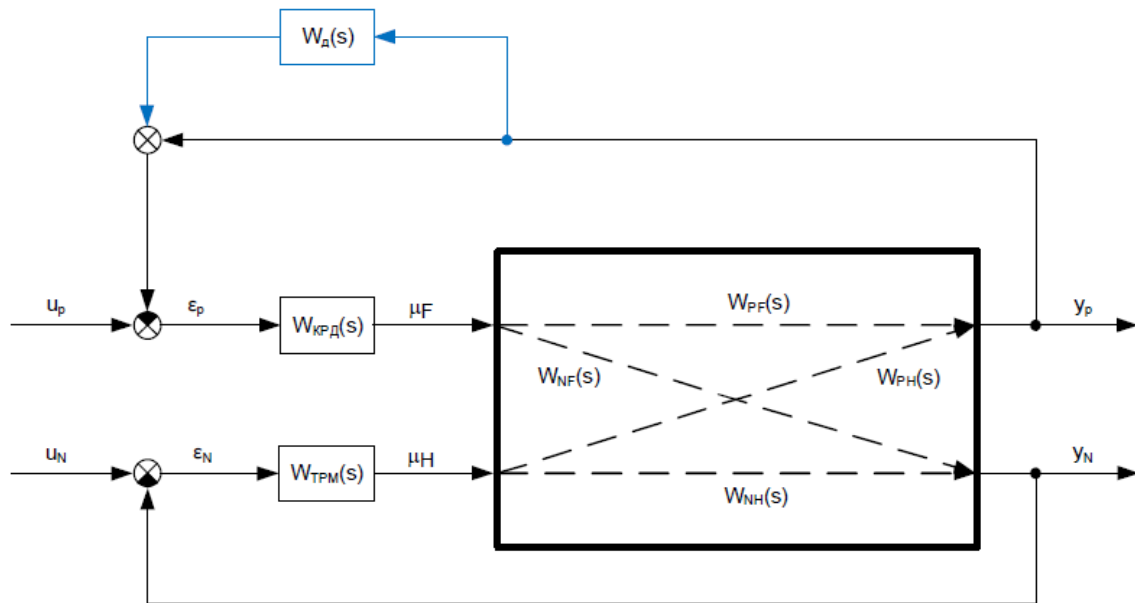


Рис. 2.2. Схема САКП з передвімкненим диференціатором на КРТ

Барабанні котли мають більшу акумулюючу здатність порівняно з прямоточними. Зміна тиску пари за котлом під час збурення клапанами турбіни відбувається набагато інерційніше.

Інтегруючі властивості еквівалентного об'єкта $\Phi_{PF}(s)$ (1.2) для КРТ у складі САКП для барабанних котлів не так сильно виражені, як для прямоточних котлів. Внаслідок цього можна досягти необхідної якості підтримки тиску y_p , застосовуючи відомі методи налаштування АСР як для «звичайних» об'єктів самовирівнювання. Цим пояснюється, що САУМ-2 знайшла у вітчизняній енергетиці застосування на енергоблоках з барабанними котлами, на відміну від енергоблоків із прямоточними котлами.

Одним із завдань цієї роботи є розробка методу налаштування САУМ з «чистим» ТРТ та передвімкненим диференціатором на КРТ (рис. 2.2), що дозволяє використовувати цю схему на енергоблоках з прямоточними котлами та підвищити якість регулювання при її використанні на енергоблоках з барабанними котлами.

Еквівалентний об'єкт без самовирівнювання в САКП (2.2) не є предметом дослідження у цій роботі, з'являється лише у схемі з «чистим» регулятором потужності на турбіні. Порівняльний аналіз всього безліч існуючих схем САКП не є предметом справжньої роботи. Однак для оцінки переваг та недоліків САКП, побудованої за схемою рис. 16, її динамічні властивості необхідно порівняти з властивостями найбільш поширеною на пострадянському просторі координованої схеми САКП (рис. 2.1).

2.3. Розрахунок параметрів налаштування АСР з ПІ-регулятором та передувімкненим диференціатором

Існуючі методи розрахунку параметрів налаштування АСР, що містять реальний диференціатор, наприклад, реального ПІД-регулятора, припускають пошук оптимуму трьох параметрів k_p , T_i та k_d (або T_f) при фіксованому четвертому - T_f (або k_d). При цьому можна виділити три рекомендовані способи:

Спосіб А. Фіксується значення T_f (як правило, рекомендується значення $T_f=5 - 10$ сек) і розраховуються три інші параметри k_p , T_i і k_d – див. [38];

Спосіб Б. Те саме, що Спосіб А, тільки фіксується співвідношення T_f/T_d , де $T_d = k_d \cdot T_f$ – постійна часу диференціювання (насправді фіксується значення k_d). Рекомендоване значення $T_f/T_d = 1/8$ – див [39], що відповідає фіксованому значенню $k_d = 8$.

Спосіб В. Значення T_f визначається, виходячи з амплітуди та частоти дії збурень. У цьому випадку аперіодична ланка у складі реального диференціатора $W_d(s)$ відіграє роль високочастотної фільтра складової збурення – див. [38].

Пропонується альтернативний метод розрахунку параметрів регуляторів, що містять реальну Д-складову (у даному випадку розрахунку ПІ-регулятора з передувімкненим диференціатором) передбачає визначення

значення T_ϕ , виходячи з причини застосування реального диференціатора замість ідеального – обмежень щодо інтенсивності регулюючого впливу.

З урахуванням схеми побудови АСР (рис. 2.3), передавальних функцій ПІ-регулятора (2.3) та реального диференціатора (2.4) умову по інтенсивності регулюючої дії можна записати у вигляді (2.5)

$$W_p(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.3)$$

$$W_d(s) = k_d \left[1 - \frac{1}{1 + T_\phi s} \right] = \frac{k_d T_\phi s}{1 + T_\phi s}, \quad (2.4)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |\Phi_{\mu y}(j\omega)| = k_p(T_\phi) \cdot [1 + k_d(T_\phi)] \leq \mu_{max}/y_{max}, \quad (2.5)$$

де $k_p(T_\phi)$ та $k_d(T_\phi)$ – значення k_p та k_d при заданому T_ϕ .

У [39] запропоновано метод налаштування реального ПІД-регулятора, в якому ведеться прямий пошук абсолютного мінімуму I^2 або I на межі стійкості шляхом розрахунку цих критеріїв для множини значень двох параметрів налаштування (k_p і T_i) при фіксованих двох інших параметрах, що залишилися: відносини $\alpha = T_d/T_i$ та $T_\phi = T_d/8$. Цей метод можна адаптувати, визначаючи три параметри (k_p , T_i та k_d), виходячи з абсолютного мінімуму I^2 або I на гіперповерхні кордону ОЗЗ, при заданому четвертому (T_ϕ), що визначається, виходячи з умови (2.5).

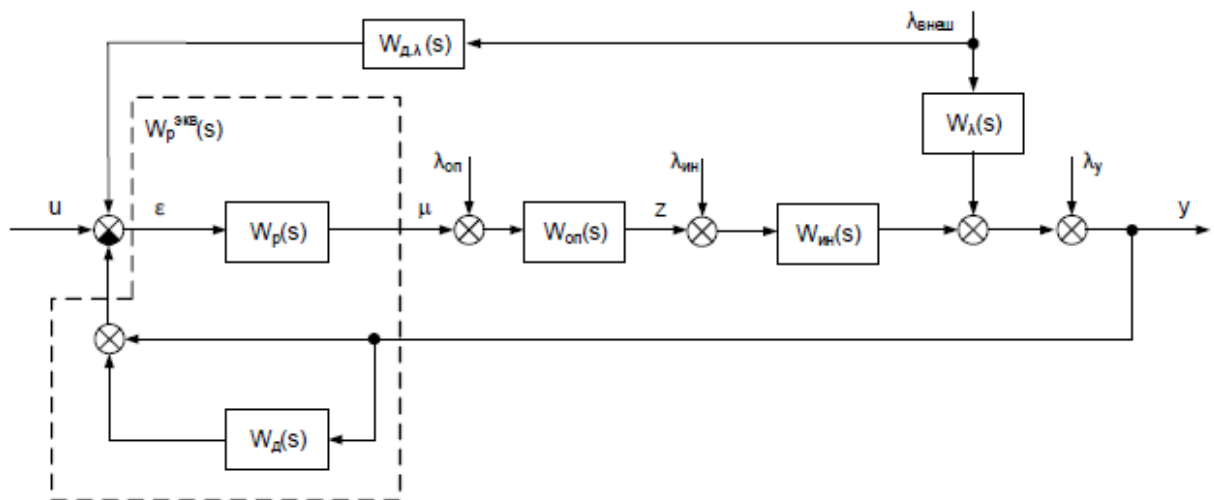


Рисунок 2.3. На прикладі АСР рівня з додатковим диференціюванням регульованої величини.

У роботі пропонується наступний алгоритм розрахунку оптимальних параметрів k_p , T_i , k_d та T_ϕ [24]:

1. Задається деяке мале значення T_ϕ (чим нижче значення T_ϕ , то ближче алгоритм диференціювання до ідеального);
2. Послідовно задаються значення k_d у діапазоні від 0 до верхньої межі пошуку $k_{d,max}$ з деяким кроком дискретизації Δk_d .
3. а) Для кожного заданого значення k_d (при фіксованому T_ϕ) розраховуються налаштування ПІ-регулятора в АСР з еквівалентним об'єктом у вигляді:

$$W_{об}(s) = W_{гл}(s)[1 + W_d(s)] \quad (2.6)$$

Розрахунок ведеться за обмеження на кореневий показник коливності з урахуванням мінімуму I^2 чи I .

б) Одночасно ведеться пошук значення оптимального k_d , у якому досягається абсолютний мінімум I^2 чи I .

4. Перевіряється умова (2.5). Якщо воно не виконується, то значення T_ϕ змінюється у відповідний бік, а кроки 2-3 повторюються. Якщо умова (2.5) дотримано, то знайдені параметри k_p , T_i , k_d та T_ϕ є оптимальними.

Розрахунок ПІ-регулятора з передвімкненим диференціатором по запропонованого алгоритму показано на рис. 2.4 і 2.5 на прикладі об'єкта з функцією передачі з використанням програмного пакета Mathcad.

На початку розрахунку (див. рис. 2.4) задаються передавальні функції об'єкта по головному каналу, ПІ-регулятора та реального диференціатора залежно від їх параметрів налаштування, передатна функція еквівалентна об'єкта (26), а також передавальна функція замкнутої системи через головний канал.

Ступінь згасання ψ задається у явному вигляді та за відомим співвідношенням [36] обчислюється відповідний кореневий показник коливання m .

Параметри $\omega_{\max}$ і $k_{r\max}$ визначають верхні межі діапазону пошуку $\omega_{\text{рез}}$ та оптимального k_r відповідно. Значення $k_{r\max}$ може бути використане як додаткове обмеження, якщо умова (2.5) відповідно до п. 4 алгоритму не виконується за жодних значень T_ϕ .

Відповідно до методу розрахунку ПІ-регулятора при обмеженні на m [36] описуються: функція розширеної КЧХ еквівалентного об'єкта (2.6), залежності k_r та $k_i = k_r/T_i$ для визначення межі заданого запасу стійкості в координатах (k_i, k_r) при заданих k_d та T_ϕ .

Визначається функція квадратичного інтегрального критерію $I^2(k_r, T_i, k_d, T_\phi)$ залежно від параметрів налаштування АСР.

У продовженні розрахунку (рис. 2.5) визначається деяке значення T_ϕ (п. 1 і 4 алгоритму) та верхня межа пошуку оптимального коефіцієнта диференціювання $k_{d\max}$. Функція пошуку оптимуму параметрів налаштування АСР при заданому T_ϕ $\text{Optimum}(T_\phi)$ являє собою три вкладені цикли, реалізують п. 2 та п. 3 алгоритму, описаного вище. В результаті обчислень отримуємо оптимальні значення параметрів k_r , T_i та k_d , а також відповідні значення I^2 і $\omega_{\text{рез}}$ при заданому T_ϕ .

В результаті перевірок умови (2.5) наприкінці розрахунку $\text{Optimum}(T_\phi)$ та відповідних коригувань значення T_ϕ перед розрахунком $\text{Optimum}(T_\phi)$ при

значенні $T_\phi = 7$ у цьому прикладі отримали $k_p(1+k_d) = 3.07$, що приблизно задовольняє прийнятому обмеженню $\mu_{\max}/y_{\max} = 3$. Тому отримані параметри з точки зору прийнятих критеріїв та обмежень є оптимальними.

Процедуру пошуку T_ϕ для умови (2.5) (п. 4 алгоритму) можна автоматизувати, організувавши четвертий зовнішній цикл у розрахунку, проте «ручний» вибір оптимального значення T_ϕ , є більше наочним.

Для контролю коректності розрахунку побудовано розширену КЧХ розімкнутої системи при знайдених налаштуваннях:

$$W_{pc}(-m\omega + i\omega) = W_{gl}(-m\omega + i\omega)W_p(-m\omega + i\omega)[1 + W_d(-m\omega + i\omega)], \quad (2.7)$$

яка перетинає точку $(-1, i \cdot 0)$ на частоті $\omega_{рез}$, що говорить про дотримання умов заданого згасання.

Мнимое число: $i := \sqrt{-1}$

Передаточные функции:

$$W_{гн}(s) := \frac{0.1 e^{-5s}}{s \cdot (1 + 30s)}$$

$$W_d(s, k_d, T_\phi) := k_d \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + T_\phi \cdot s}\right)$$

$$W_p(s, k_p, T_u) := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot s}\right)$$

$$W_o(s, k_d, T_\phi) := W_{гн}(s) \cdot (1 + W_d(s, k_d, T_\phi))$$

$$\Phi(s, k_p, T_u, k_d, T_\phi) := \frac{W_{гн}(s)}{1 + W_{гн}(s) \cdot W_p(s, k_p, T_u) \cdot (1 + W_d(s, k_d, T_\phi))}$$

Ограничения:

$$\psi := 0.9 \quad m := \frac{-\ln(1 - \psi)}{2 \cdot \pi} = 0.366 \quad k_{pmax} := 10 \quad \omega_{max} := 0.3$$

Аргумент расширенной КЧХ: $s(\omega) := -m \cdot \omega + i \cdot \omega$

Расширенная КЧХ эквивалентного объекта: $W_{расш}(\omega, k_d, T_\phi) := W_o(s(\omega), k_d, T_\phi)$

$$k_i(\omega, k_d, T_\phi) := \frac{-\left(\operatorname{Im}\left(\frac{1}{W_{расш}(\omega, k_d, T_\phi)}\right)\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{1}{s(\omega)}\right)}$$

$$k_p(\omega, k_d, T_\phi) := \operatorname{Re}\left(\frac{-1}{W_{расш}(\omega, k_d, T_\phi)}\right) - \operatorname{Re}\left(\frac{k_i(\omega, k_d, T_\phi)}{s(\omega)}\right)$$

$$I2_{\lambda}(k_p, T_u, k_d, T_\phi) := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\omega_{max}} \frac{\left[\left|\Phi(i \cdot \omega, k_p, T_u, k_d, T_\phi)\right|\right]^2}{\omega^2} d\omega$$

Рис. 2.4. Mathcad-документ. Визначення функцій розрахунку параметрів налаштування ПІ-регулятора з передвімкненим диференціатором

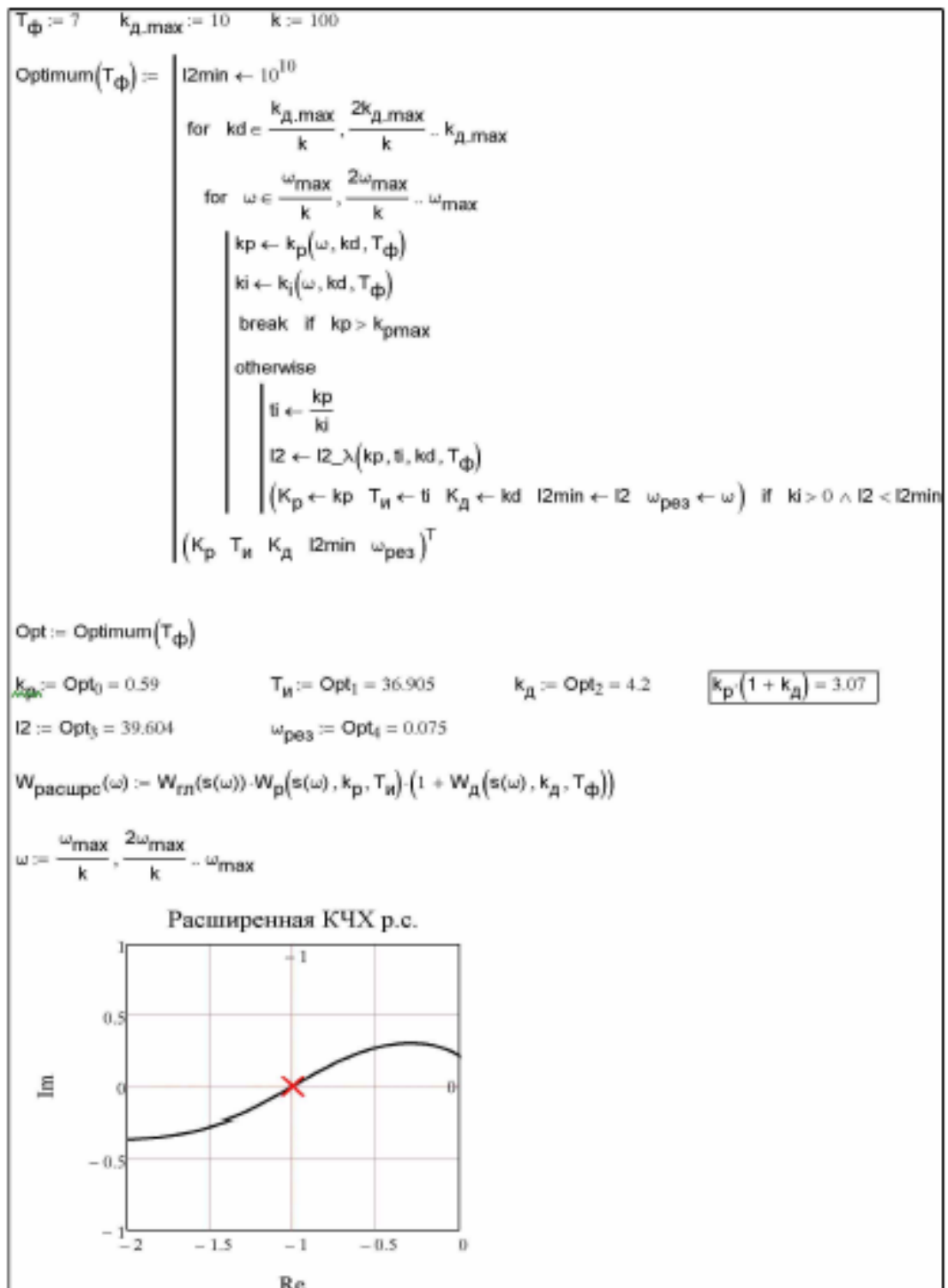


Рис. 2.5. Mathcad-документ. Розрахунок параметрів налаштування схеми з передвключеним диференціатором та побудова розширеної КЧХ розімкнутої системи.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ ЕНЕРГОБЛОКІВ

3.1. Комплексні частотні характеристики та області заданого згасання в САКП енергоблока з прямоточним котлом

У разі застосування координованої схеми САКП, показаної на рис. 3.1, передатна функція еквівалентного об'єкта котельного регулятора потужності КРМ $\Phi_{PNF}(s)$ в залежності від коефіцієнта α описується формулою:

$$\Phi_{PNF}(s, \alpha) = \frac{\alpha[W_{NF}(s)(1-\alpha W_{TPM}(s)W_{PH}(s)) + \alpha W_{TPM}(s)W_{NH}(s)W_{PF}(s)]}{1 + W_{NH}(s)W_{TPM}(s) - \alpha W_{PH}(s)W_{TPM}(s)} +$$

$$+ \frac{(1-\alpha)[W_{PF}(s)(1 + W_{TPM}(s)W_{NH}(s)) - W_{TPM}(s)W_{NF}(s)W_{PH}(s)]}{1 + W_{NH}(s)W_{TPM}(s) - \alpha W_{PH}(s)W_{TPM}(s)}. \quad (3.1)$$

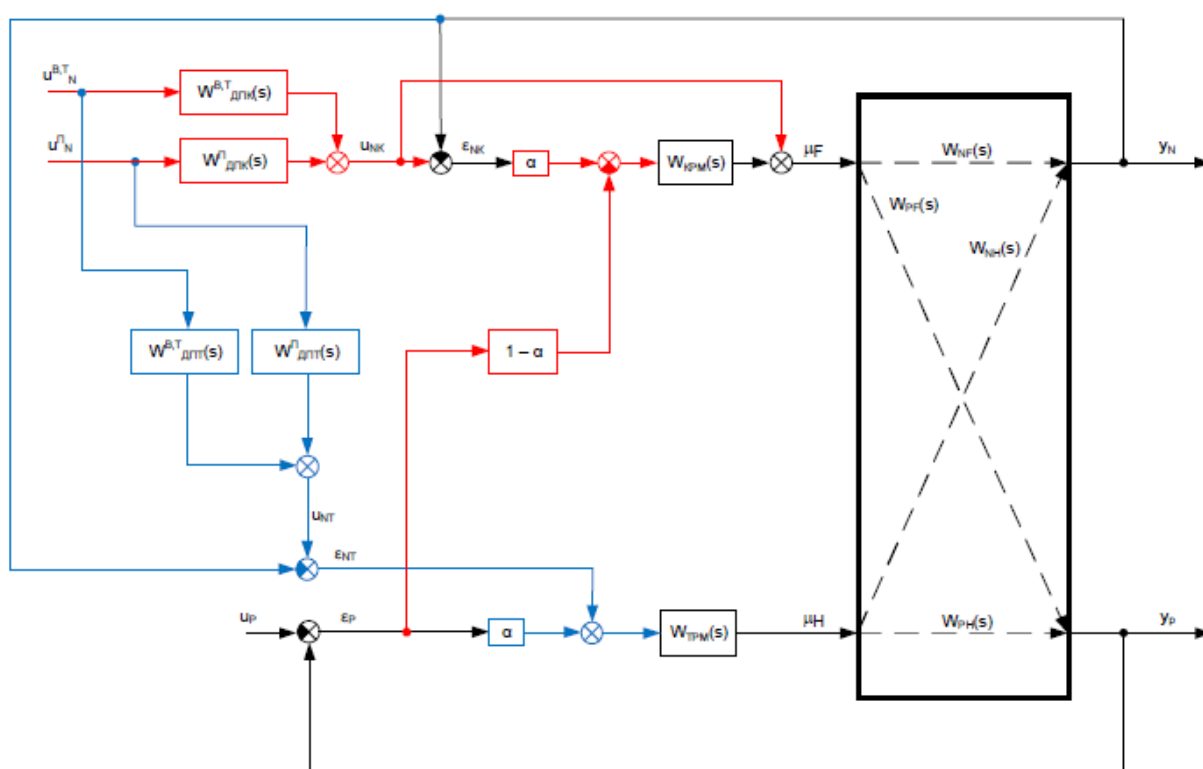


Рис. 3.1. Координована схема САКП у вигляді структурних ланок

На рис. 3.2 показані КЧХ еквівалентного об'єкта котельного регулятора координованій схемі САКП $\Phi_{\text{PNF}}(i\omega)$ (3.1) при різних значеннях (рис.3.1), у схемі з провідною турбіною $\Phi_{\text{PF}}(i\omega)$ (3.2) без диференціатора (рис. 1.4 б) та з передувімкненим диференціатором на КРТ (рис. 2.2).

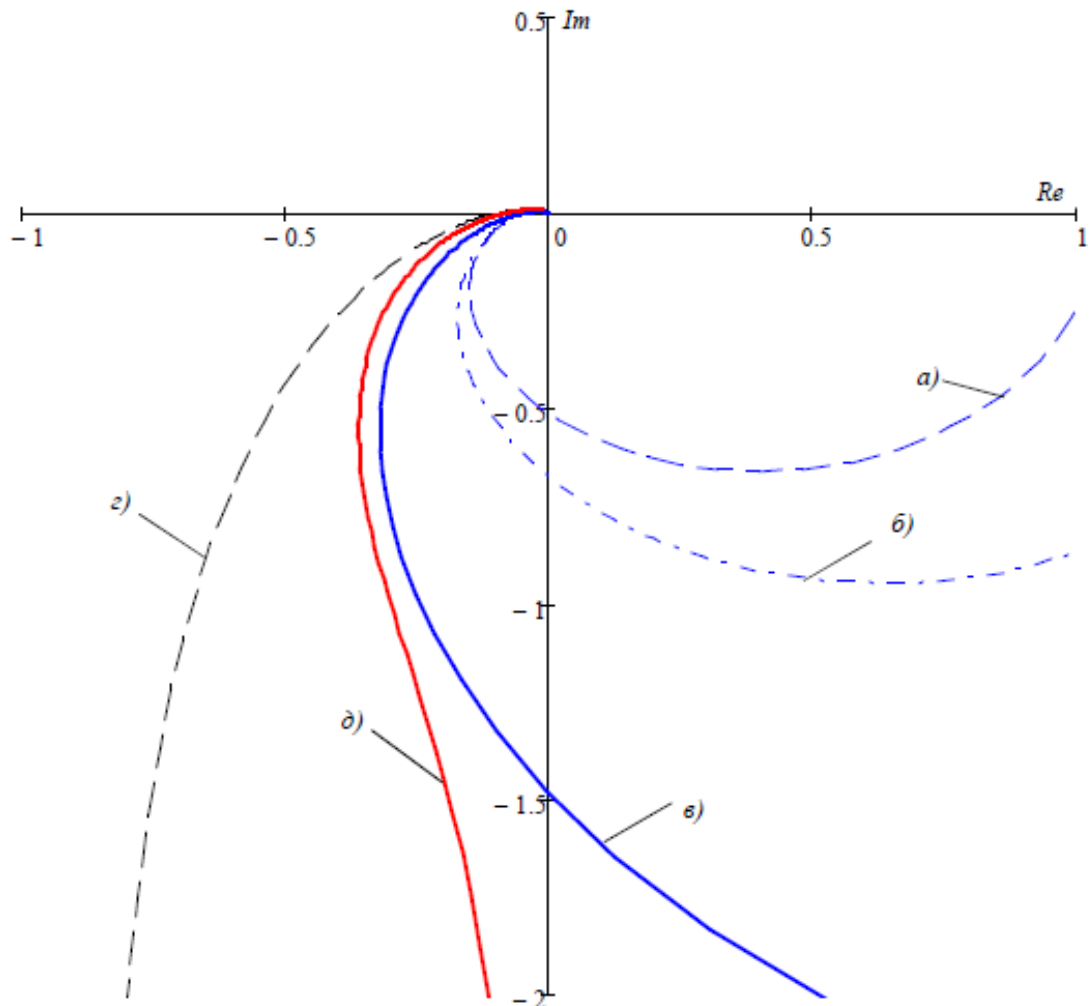


Рис. 3.2. а) КЧХ еквівалентного об'єкта $\Phi_{\text{PNF}}(i\omega, \alpha)$ КРМ(Д) координованої САКП $\alpha = 1.0$; б) те саме з $\alpha = 0.5$; в) те саме з $\alpha = 0.2$; г) КЧХ еквівалентного об'єкта $\Phi_{\text{PF}}(i\omega)$ КРД у САКП з провідною турбіною; д) те ж у САКП з провідною турбіною та передувімкненим диференціатором

На рис. 3.3 – відповідні області заданого згасання (ОЗЗ) параметрів котельного регулятора при $\psi = 0.9$. Оптимуми параметрів налаштування для різних схем, що відповідають мінімуму I_2 , відзначені знаком «+». Їх значення наведені у Таблиці 4.

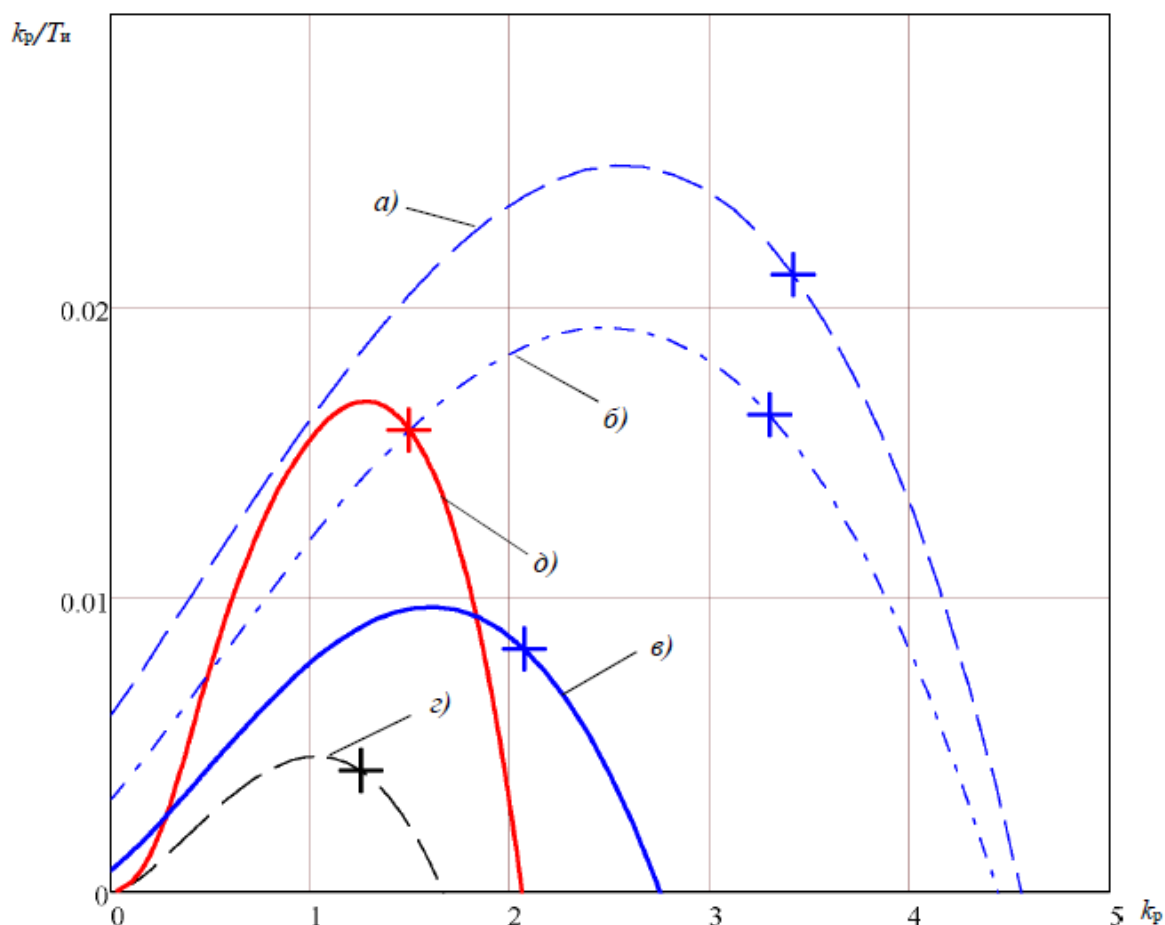


Рис. 3.3. а) ОЗЗ КРМ у координатній САКП з $\alpha = 1.0$;
 б) те саме з $\alpha = 0.5$; в) те саме з $\alpha = 0.2$; г) ОЗЗ КРД у САКП із провідною турбіною; д) те саме в САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором

Таблиця 3.1.

Параметри налаштування КРП(Д) у різних схемах САКП

№п/п	Схема	$k_{p, \text{КРМ(Д)}}$	$T_{и, \text{КРМ(Д)}}$	k_d	T_ϕ
а)	Координированная, $\alpha=1.0$	3.42	162	—	—
б)	Координированная, $\alpha=0.5$	3.30	220	—	—
в)	Координированная, $\alpha=0.2$	2.07	250		
г)	С ведущей турбиной	1.26	305	—	—
д)	С ведущей турбиной и Д на КРД	1.53	92	2.52	26

При $\alpha = 1$ передатна функція еквівалентного об'єкта КРП (3.1) та відповідна КЧХ (крива а рис. 3.2) близька передавальній функції до КЧХ

еквівалентного об'єкта у «чистій» схемі з провідним котлом (рис. 1.4 а). Котельня регулятор при такому значенні α має досить велику ОЗЗ (крива а рис. 49). При зниженні α та збільшенні «ваги» ε_N у формуванні небалансу для турбінного регулятора потужності КЧХ еквівалентного об'єкта КРП «розгортається» третій квадрант комплексної площини, що зменшує відповідні ОЗЗ: криві б і на рис. 3.2 і 3.3 відносяться до значень коефіцієнта $\alpha = 0.5$ і $\alpha = 0.2$. Нарешті, при $\alpha = 0$ передатна функція (3.1) вироджується в передавальну функцію еквівалентного об'єкта КРТ в САКП з провідною турбіною, який має інтегруючі властивості (крива г рис. 3.2) та надзвичайно малою ОЗЗ КРТ (крива г рис. 3.3).

КРТ у САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором (рис. 2.2), налаштована розглядаємим у цій роботі методом, має меншу ОЗЗ, ніж ОЗЗ координованої схеми (крива рис. 3.2), проте достатньої, щоб уникнути неприпустимих відхилень ε_p .

У таблиці 3.2 наведено оптимальні параметри налаштування КРТ у САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором при різних параметрах налаштування ТРП у широкій області навколо вихідних ($k_{p,TRM} = 3$, $T_{i,TRM} = 5$ сек.; п. 4 Таблиці 3.2), але на рис. 3.4 - відповідні ОЗЗ.

За результатами розрахунків видно, що ОЗЗ та оптимальні параметри налаштування КРТ помітно змінюються лише за $k_{p,TRM} \rightarrow 0$ (п. 1 таблиці 3.2), тобто, коли ТРП фактично відключено, а також при суттєвому збільшенні $T_{i,TRM} \rightarrow \infty$ (п. 9 Таблиці 3.2), причому у обох випадках ОЗЗ розширюється (початкова ОЗЗ лежить всередині одержаної ОЗЗ). В інших випадках параметри КРТ практично не змінюються. Це з тим, що швидкодіючий ТРП і КРТ мають різний порядок власних частот, тобто «розв'язані» за частотою. Ця обставина дозволяє налаштовувати ТРП і КРТ у схемі рис. 2.2 незалежно один від одного в будь-якій послідовності.

Таблиця 3.2.

Залежність параметрів налаштування КРТ від параметрів налаштування
ТРП у складі САКП

№п/п	Заданные параметры ТРМ		Рассчитанные параметры КРД			
	$k_{p,TRM}$	$T_{I,TRM}$	$k_{p,KPD}$	$T_{I,KPD}$	k_d	T_ϕ
1.	0.01	5.0	2.52	90	1.12	43
2.	0.5		1.46	95	2.68	26
3.	1.5		1.50	93	2.56	26
4.	3.0		1.53	92	2.52	26
5.	6.0		1.50	94	2.48	27
6.	3.0	0.1	1.52	94	2.52	27
7.		2.5	1.50	94	2.48	27
8.		10.0	1.49	96	2.52	27
9.		1000.0	1.73	95	2.04	31

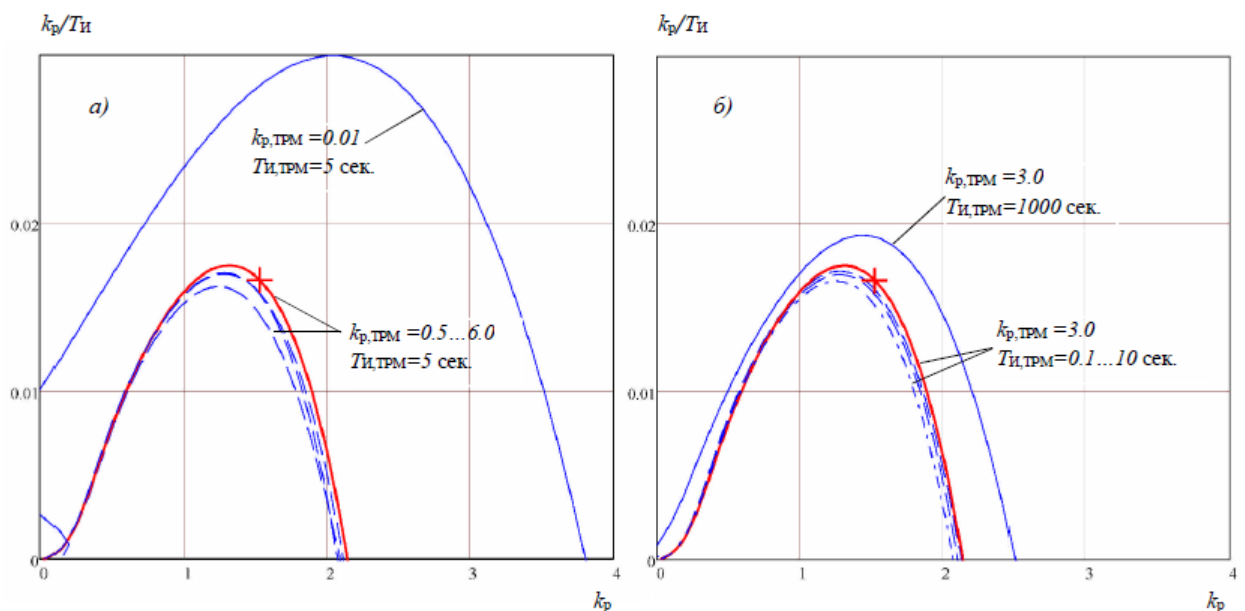


Рис. 3.4. ОЗЗ КРД у САКП з провідною турбіною та передв'імкненим диференціатором при варіаціях параметрів налаштування ТРП: а) при варіації $k_{p,TRM}$; б) при варіації $T_{I,TRM}$

3.2. Моделювання процесів регулювання в САКП енергоблоку з прямоточним котлом

Імітаційні моделі САКП виконані з використанням програми Simulink, яка є програмою до пакету MatLab. Імітаційна модель енергоблоку (див. рис. 3.5) виконана у вигляді чотириполосника, як зображено на рис. 1.4. Тобто вона має два (основні) входи:

- задане навантаження котла (задана витрата палива або задана витрата поживної води) F ;

- узагальнене завдання положення клапанів парової турбіни H ;

і два виходи:

- тиск гострої пари перед турбіною P ;

- активна потужність генератора N .

Для зручності порівняння перехідних процесів у моделі з процесами, отриманими на реальному об'єкті модель виконана у приростах щодо деяких початкових (ненульових) значень вхідних та вихідних змінних:

- початкове значення тиску пари – 100% (режим номінального тиску);

- початкові значення заданого навантаження котла, положення клапанів та активної потужності дорівнюють значенню початкового навантаження енергоблоку N_{init} , який є додатковим вхідним сигналом моделі рис. 3.5.

Зв'язки між вхідними та вихідними змінними відповідають передатним функціям (3.2) – (3.5). При цьому використовувалися як стандартні елементи Simulink, так і користувальницькі блоки аперіодичного ланки, що дозволяють отримати перехідні процеси за ненульових початкових умов

$$W_{PF}(s) = \frac{1.14e^{-5s}}{(1+75s)^2} ; \quad (3.2)$$

$$W_{NF}(s) = \frac{1.05e^{-5s}}{(1+90s)^2(1+20s)} ; \quad (3.3)$$

$$W_{PH}(s) = \underbrace{-1.46 \left[\frac{0.27}{(1+2s)^2} + \frac{0.73}{(1+90s)^2(1+10s)} \right]}_{\text{швидка частина}} ; \quad (3.4)$$

$$W_{NH}(s) = \underbrace{0.7 \left[\frac{0.6}{(1+2s)^2} + \frac{0.4}{1+40s} \right]}_{\text{швидка частина}} \cdot \left[1 - \frac{1}{(1+11s)^4(1+110s)} \right] . \quad (3.5)$$

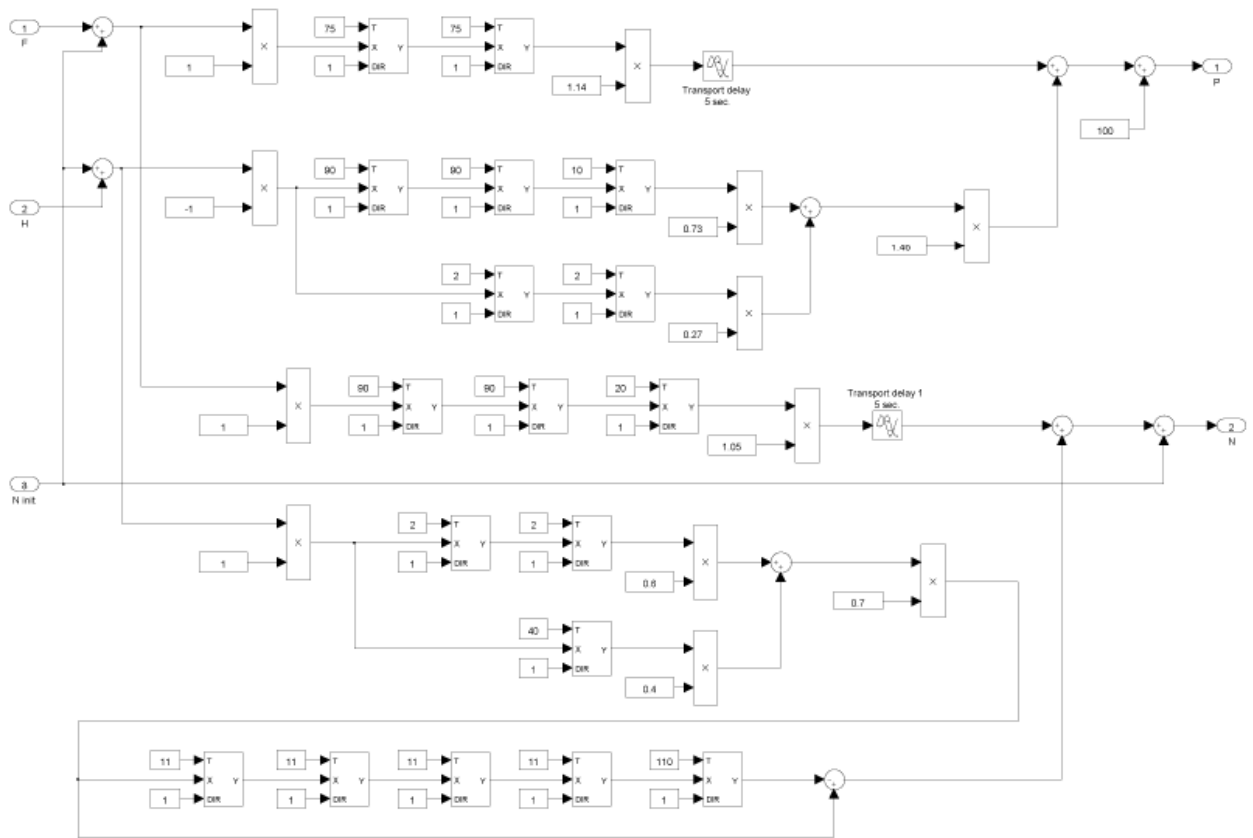


Рис. 3.5. Модель енергоблока

Імітаційна модель (діаграма у програмі Simulink) координованої схеми САКП показано на рис. 3.6, а схеми САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ - на рис. 3.7.

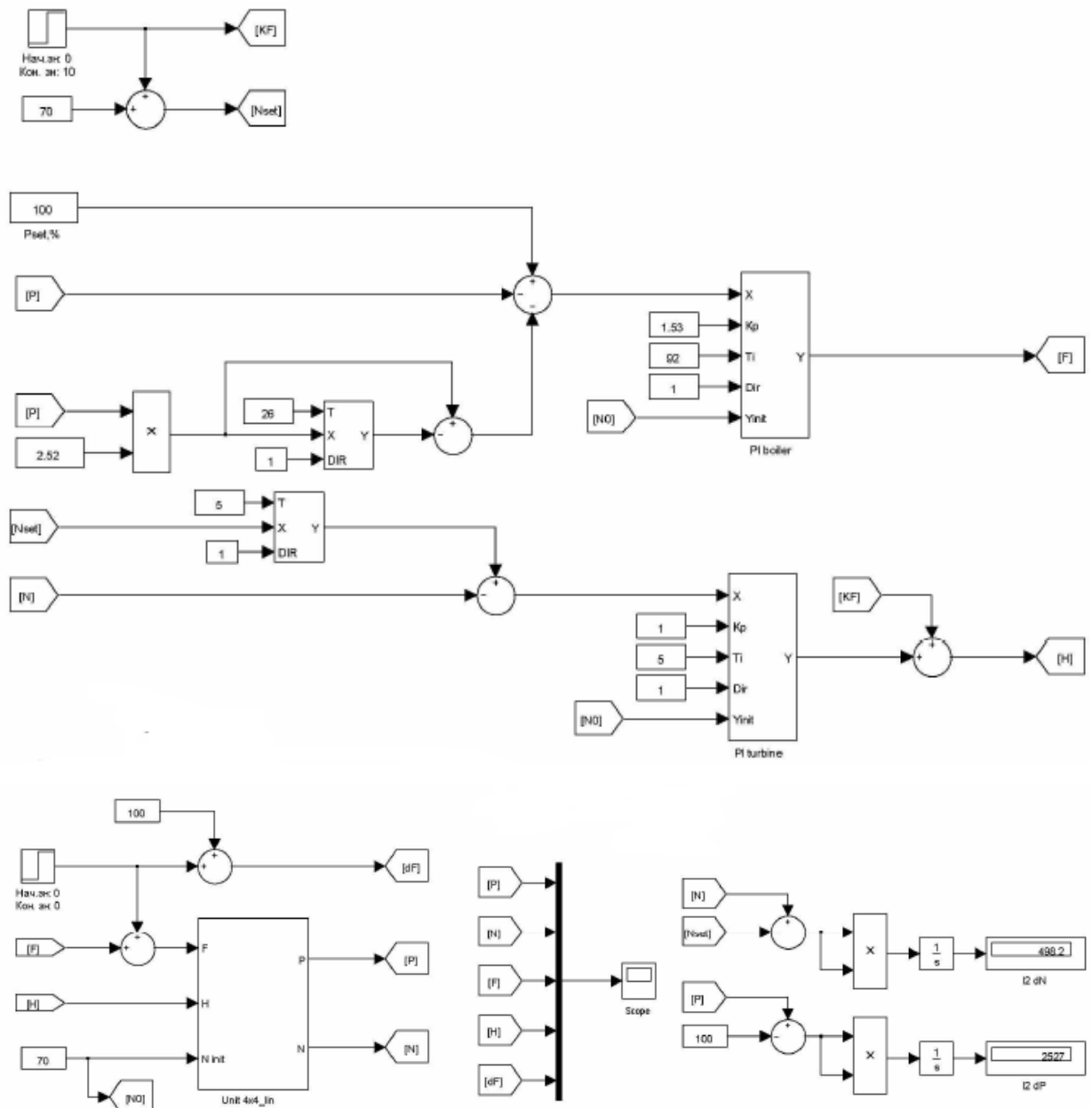


Рис. 3.7. Імітаційна модель САКП з провідною турбіною та передувімкненим диференціатором на КРТ

На діаграмах прийнято такі позначення параметрів:

- [Nset] – задане навантаження енергоблока $N_{зд}$;
- [KF] – вихідний сигнал коректора частоти;
- [dP] – помилка регулювання тиску εP ;
- [Alfa] – коефіцієнт α сигналу по εP ;
- [dF] – обурення заданим навантаженням котла F ;

Моделі рис. 3.6 і 3.7 загалом відповідають схемам, представленим на рис. 2.2 та 3.1, з урахуванням наступних доповнень:

1) На схемах рис. 2.2 та 3.1 не показаний регулятор частоти обертання (РЧО) парової турбіни, який необхідно враховувати під час моделювання перехідних процесів при реалізації первинного регулювання потужності. П-регулятор частоти обертання, що не відключається, впливає на регулюючі клапани турбіни крім турбінного регулятора потужності. Його зона нечутливості та коефіцієнт пропорційності (ступінь нерівномірності) дорівнюють зоні нечутливості та коефіцієнту пропорційності (ступеня нерівномірності) коректора частоти. Тому при відхиленні частоти мережі виходи коректора частоти та РЧО рівні. Отже, замість окремого моделювання РЧО можна прийняти, що на становище регулюючих клапанів турбіни впливає сигнал K_F від коректора частоти. Таким чином, у моделях рис. 3.6 і 3.7 сигнал K_F впливає та на задане навантаження енергоблока N_{set} , та безпосередньо на положення РК турбіни H .

2) ТРП у схемі рис. 2.2 характеризується високою швидкодією. Для деяких об'єктів як, наприклад, для даного випадку, у разі зміни заданого навантаження енергоблока $N_{зд}$ така швидкодія не потрібна і є навіть шкідливою. Тому в моделі 3.6 на сигналі N_{set} , що йде в ТРП поставлено аперіодичну ланку з постійної доби 5с.

3.3. Перехідні процеси в САКП із прямоточним котлом

На рис. 3.8 та 3.9 показані перехідні процеси в імітаційних моделях координованої САКП (рис. 3.1, 3.6) при значеннях $\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.5$, $\alpha = 0.2$, «чистої» САКП з провідною турбіною ($\alpha = 0$) і в САКП з провідною турбіною і передувімкненим диференціатором на КРТ (рис. 2.2, 3.7) з оптимальними параметрами налаштування, наведеними в Таблиці 3.3, при збуренні з боку

узагальненого завдання навантаження котла $\Delta F = -10\%$ (обурення наносилося у момент часу $t = 10$ сек.).

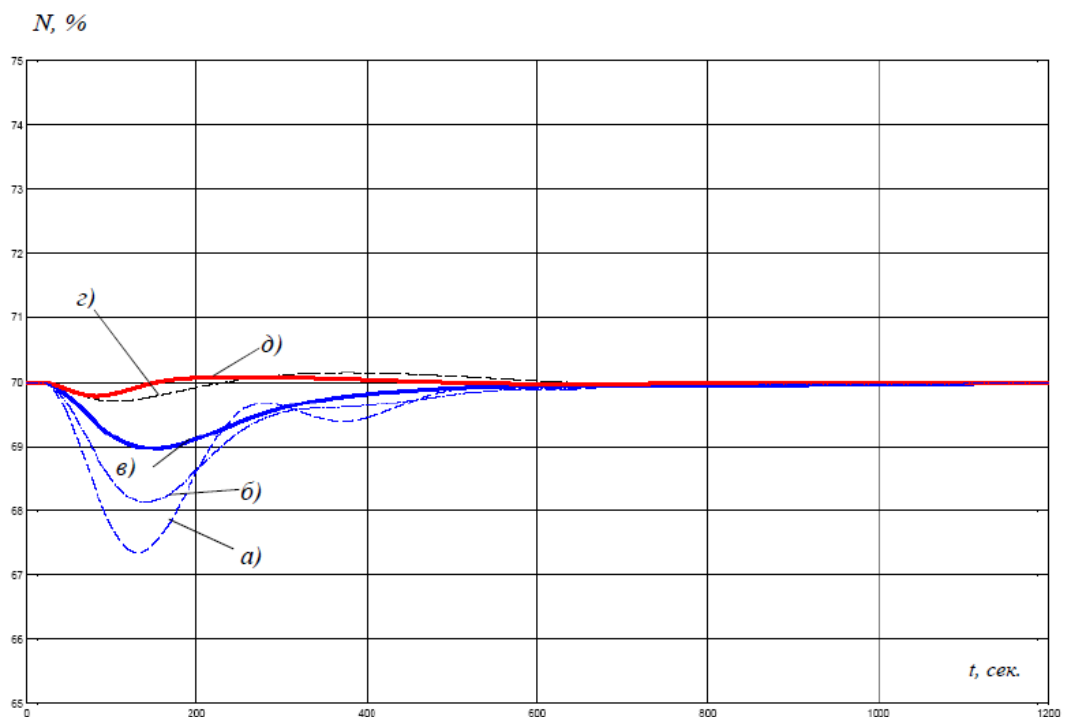
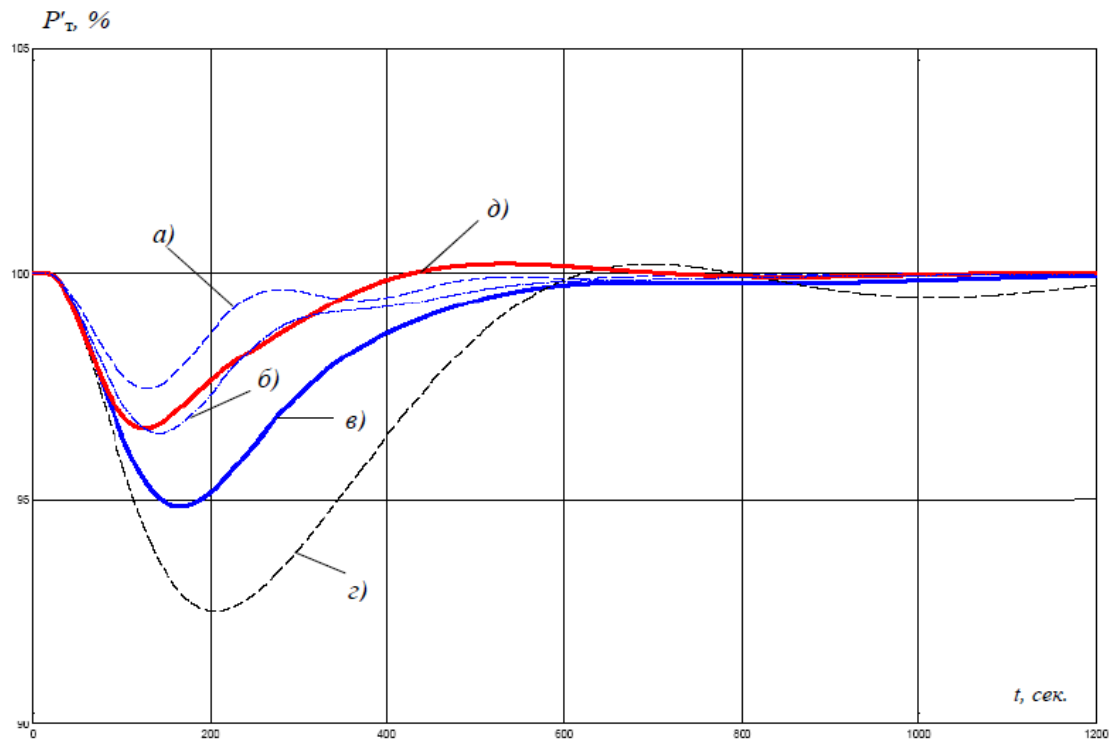


Рис. 3.8. Перехідні процеси по $P'_т$ та N у моделях САКП при ступінчастому збуренні ΔF на -10% : а) у координатній САКП з $\alpha = 1.0$; б) те саме з $\alpha = 0.5$; в) те саме з $\alpha = 0.2$; г) в САКП з провідною турбіною д) те ж саме з передвключеним диференціатором на КРТ

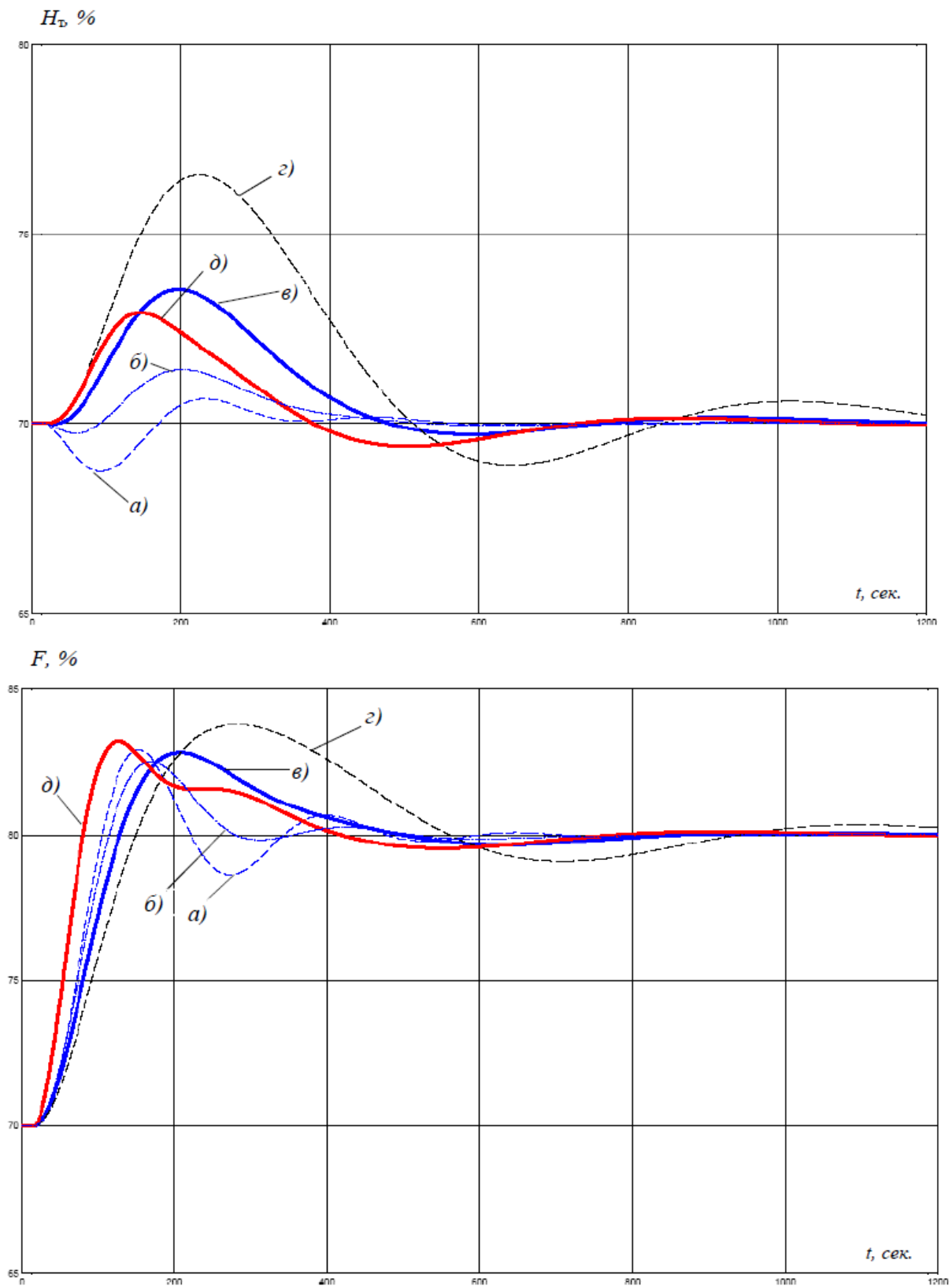


Рис. 3.9. Перехідні процеси по H_v і F у моделях САКП при ступінчастому збуренні ΔF на -10% : а) у координованій САКП з $\alpha = 1.0$; б) те саме з $\alpha = 0.5$; в) те саме з $\alpha = 0.2$; г) в САКП з провідною турбіною д) те ж саме з передвключеним диференціатором на КРТ

Чисельні показники, що характеризують якість процесів регулювання при збуренні з боку котла наведено у Таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Чисельні показники процесів регулювання у САКП при збуренні

$$\Delta F = -10\%$$

№ п/п	Схема САУМ	Квадратичный интегральный критерий I^2		Максимальное отклонение, %		Длительность процесса, сек	
		по N	по P'_T	$ N - N_{зд} $	$\frac{ P'_T - 100\% }{100\%}$	по N	по P'_T
а)	Координированная, $\alpha = 1.0$	736	708	2.7	2.5	600	800
б)	Координированная, $\alpha = 0.5$	447	1712	1.8	3.3	600	800
в)	Координированная, $\alpha = 0.2$	161	4577	1.0	5.0	600	800
г)	С ведущей турбиной	12	12650	0.3	7.5	200	1200
д)	С ведущей турбиной и Д на КРД	3	1584	0.3	3.1	200	800

При обуренні, що розглядається, координована схема з $\alpha = 1.0$ має найкращу якість підтримки тиску пари перед турбіною P'_T і одночасно найгіршою якістю підтримки потужності блоку N як по інтегральному квадратичному критерію I^2 , прийнятого для порівняння схем, так і за іншими критеріями, що характеризують якість регулювання: максимальному відхиленню параметра та тривалості процесу.

Зі зниженням значення α у координованій схемі покращується якість регулювання N та погіршується якість регулювання P'_T . У «чистій» схемі з провідною турбіною, в яку вироджується координована схема при $\alpha = 0$, спостерігається найкраща якість процесу N і найгірша P'_T .

У схемі з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ якість процесу регулювання по P'_T можна порівняти з якістю цього процесу координованої схеми при $\alpha = 0.5$, а якість процесу N навіть вище, ніж за «чистої» схемою САКП з провідною турбіною – див. рис. 3.8 криві (б), (г) та (д) і відповідні рядки у Таблиці 3.3.

Як уже згадувалося вище, чинні вимоги до САКП накладають обмеження на відхилення P'_t і N при дії різних збурень [1], [2].

Зокрема, згідно з вимогами до участі у нормованому первинному регулюванні частоти (НПРЧ), відхилення N від завдання $N_{зд}$ у всіх режимах не має перевищувати 1% встановленої потужності енергоблока. Крім того, одним з найважливіших є технологічне обмеження щодо відхилення тиску гострої пари P'_t . Наприклад, на енергоблоці, що розглядається тут 300 МВт із прямоточним котлом, що працює на номінальному тиску 240 кгс/см², відхилення P'_t від номінального не повинно перевищувати +15 кгс/см² – тобто 6.25% від номінального значення. Якщо прийняти, що максимально можливим обуренням з боку котла, при якому енергоблок залишається в роботі та бере участь у нормованому первинному регулюванні частоти (НПРЧ), є обурення, еквівалентне 10%-ного навантаження котла $\Delta F=+10\%$, то з схем, що розглядаються вимогам НПРЧ задовольняють тільки координована схема САКП з $\alpha = 0.2$ і схема з провідною турбіною та передувімкненим диференціатором на КРД (див. Таблицю 6), при цьому остання має найкращі показники якості.

На рис. 3.10 і 3.11 показані перехідні процеси в цих двох схемах при ступінчастому 10%-му обуренні завданням по навантаженню енергоблока $N_{зд}$ зі сторони коректора частоти з урахуванням дії РЧО, а в Таблиці 7 відповідні чисельні показники якості.

Таблиця 3.4.

Чисельні показники процесів регулювання у САКП при
збуренні $\Delta N_{зд} = +10\%$

№ п/п	Схема САУМ	Квадратичный интегральный критерий I^2		Максимально е отклонение $ P'_t - 100\% , \%$	Длительность процесса, сек	
		по N	по P'_t		по N	по P'_t
а)	Координированная, $\alpha=0.2$	323	2458	6.8	120	1 000
б)	С ведущей турбиной и Д на КРД	498	2741	6.5	120	1 000

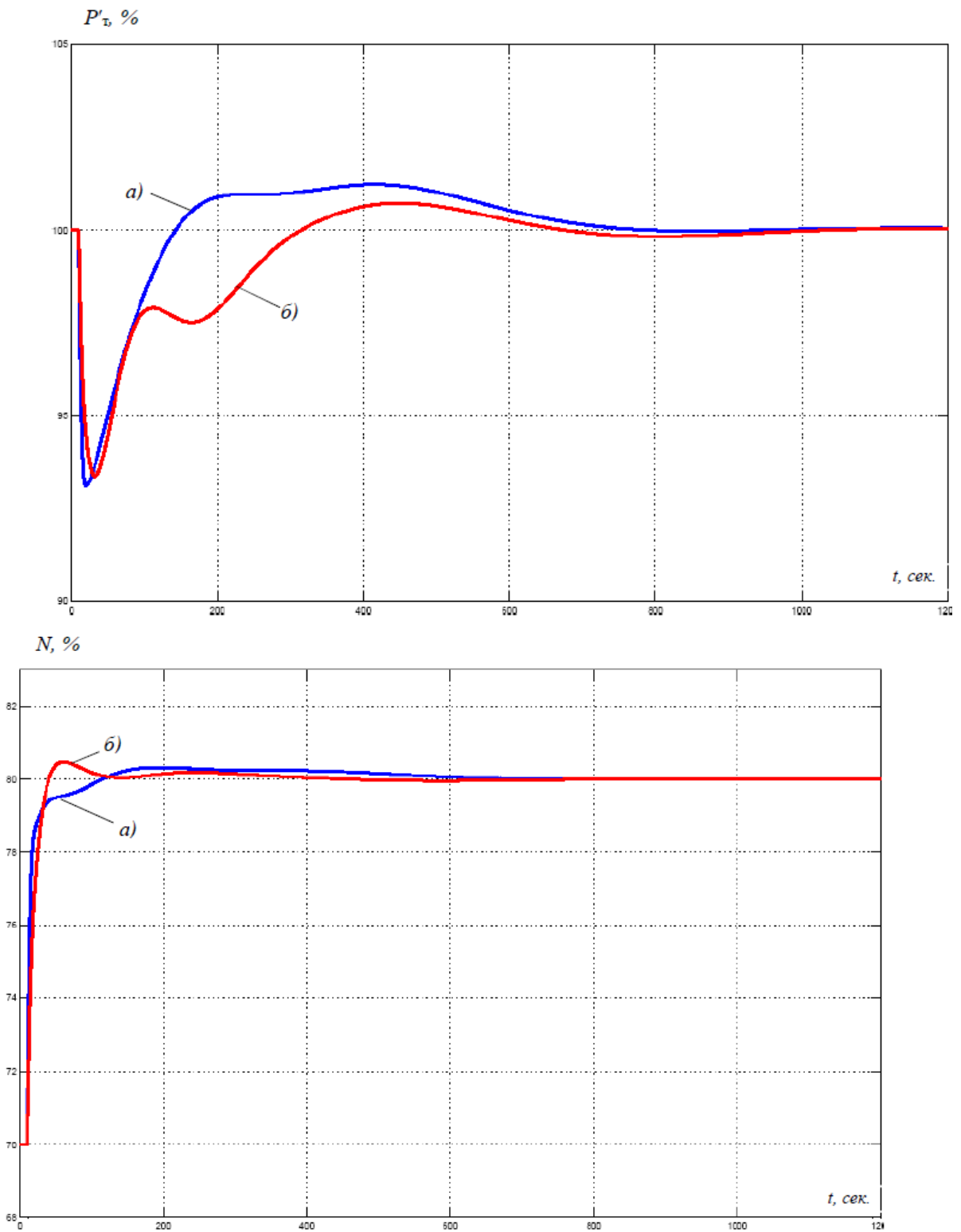


Рис. 3.10. Перехідні процеси по P'_T та N у моделях САКП при ступінчастому збуренні $\Delta N_{зд}$ на +10%: а) у координованій САКП з $\alpha = 0.2$; б) у САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ

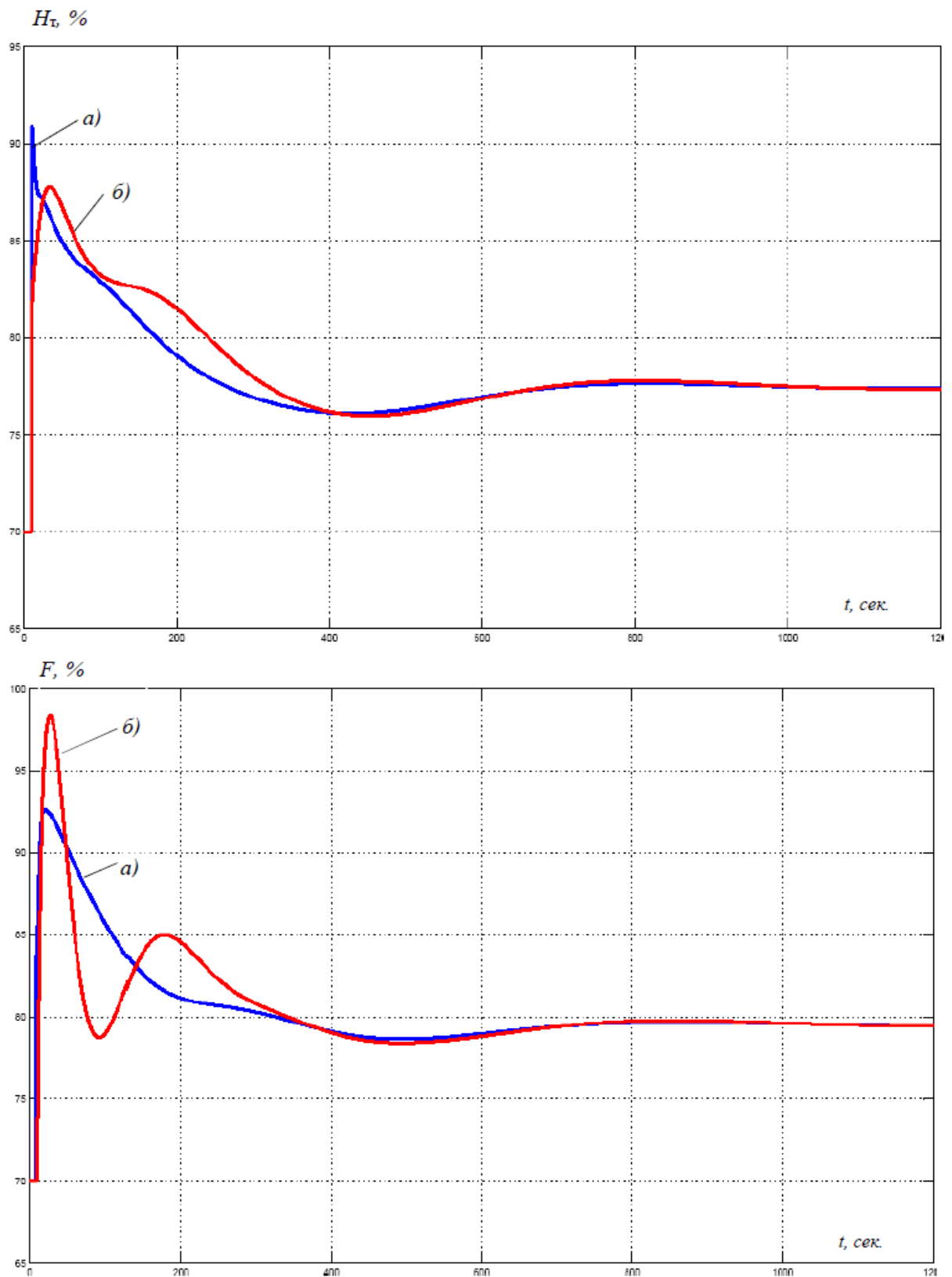


Рис. 3.11. Перехідні процеси по H_t і F у моделях САКП при ступінчастому обуренні $\Delta N_{зд}$ на +10%: а) у координованій САКП з $\alpha = 0.2$; б) у САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ

Динаміка зміни первинної потужності енергоблока номінальною потужністю $N_{\text{ном}}$ при максимальній потрібній первинної потужності $\Delta N_{\text{зд}}^{\text{п}} = 5\% N_{\text{ном}}$ має бути не гірше: $2,5\% N_{\text{ном}}$ – за 10 секунд, $5\% N_{\text{ном}}$ – за 30 секунд; за максимальної необхідної первинної потужності $\Delta N_{\text{зд}}^{\text{п}} = 10\% N_{\text{ном}}$ динаміка зміни первинної потужності енергоблока повинна бути негірше: $5\% N_{\text{ном}}$ – за 15 секунд, $10\% N_{\text{ном}}$ – за 300 секунд для енергоблоків, що працюють на газі, і за 360 секунд – для енергоблоків, що працюють на вугіллі.

Процеси регулювання математичної моделі обох схем САКП (див. Рис. 3.10) при 10%-му обуренні $\Delta N_{\text{зд}}$ задовольняють зазначеним вимогам.

При цьому в координатній схемі квадратичні інтегральні критерії I^2 як по N , так і P трохи нижче, ніж у схемі з провідною турбіною і передувімкненим диференціатором на КРТ (див. Таблицю 7). Однак порівняно з різницею цих критеріїв при збуренні з боку навантаження котла ΔF (див. Таблицю 6) різниця значень I^2 при обуренні $\Delta N_{\text{зд}}$ дуже незначна.

Таким чином, застосування додаткового диференціювання на КРТ схемою САКП з провідною турбіною та розробленого автором методу розрахунку параметрів її налаштування дозволяють досягти високої якості регулювання, як при дії збурень з боку котла, що особливо актуально на пилувугільних енергоблоках, так і з боку $N_{\text{зд}}$.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСР ІНТЕГРУЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ

4.1. Експериментальні дослідження АСР інтегруючих об'єктів з ПІ-регулятором та передвключеним диференціатором

Розглянемо експериментальні дослідження АСР, побудованих за схемою ПІ-регулятора з передвключеним диференціатором для котельних регуляторів тиску у складі САКП у відповідності до рис. 2.2.

На рис. 4.1–4.2 наведено приклади реалізації параметрів САКП на різних теплоенергетичних об'єктах.

На рис. 4.1 – графік зміни технологічних параметрів пиловугільного енергоблока 325 МВт із двокорпусним прямоточним котлом ст. №8 Зміївської ТЕС за 8 годин. Протягом цього часу відбувалася планова зміна завдання по навантаженню з 300 до 200 МВт (у період з 22:00 до 00:00), крім того, мали місце збурення з боку котла (наприклад, у період з 20:30 до 21:00 та з 00:00 до 01:00). За час відхилення $|N-N_{зд}|$ не перевищило 1 МВт, а відхилення $|P_t-P_{зд}|$ - не більше 8 бар при високій інтенсивності обурень і не більше 3 бар «спокійному» режимі.

На рис. 4.2 показано аналогічну реалізацію технологічних параметрів САКП пиловугільного енергоблока із прямоточним котлом ст. №1 Зуївської ТЕС протягом доби, протягом яких відбувалися як планові зміни навантаження, так і внутрішньоблочні обурення. Відхилення $|N-N_{зд}|$ не перевищило 1 МВт, а відхилення $|P_t-P_{зд}|$ - не більше 10 кгс/см².

У наведених прикладах системи регулювання із запасом задовольняють усім вимогам, що були пред'явлені до них.

Наприклад, схема САКП, впроваджена на енергоблоці №8 Зміївської ТЕС у 2004 р.

У наступних розділах наведено приклади впроваджень АСР з передувімкненим диференціатором (рис. 2.2), налаштовані з використанням представленого в [38] методу розрахунку.

4.2. Експериментальне дослідження САКП енергоблока з барабанним пиловугільним котлом ст. №9 225 МВт Курахівської ТЕС

4.2.1. Технологічний об'єкт керування, вимоги до САКП

Енергоблок 225 МВт Курахівської ТЕС складається з пиловугільного барабанного котла типу ТП-109 виробництва Таганрогського котельного заводу, конденсаційної парової турбіни типу К-200-130 ЛМЗ та допоміжного обладнання. У 2014 проходила реконструкція блоку №9, його встановлена потужність збільшилася на 15 МВт до 225 МВт, покращилися економічні та екологічні показники.

Енергоблок працює на постійному номінальному тиску $P'_t = 130 \text{ кгс/см}^2$ (це значення може змінюватися оператором за допомогою задатчика $P_{зд}$). За технологічним вимогам відхилення P'_t у всіх режимах не повинно перевищувати $+10 \text{ кгс/см}^2$ від $P_{зд}$. Для гарантованого недопущення виходу P'_t зазначені межі в ТРП передбачені відповідні «стерезучі» регулятори.

САКП повинна відповідати вимогам до систем регулювання енергоблоків, що у Стандарті [1]. Зокрема, при відхилення частоти, що викликає необхідність зміни навантаження енергоблоку на 10%, не менше половини цієї зміни має бути забезпечено за час не більше 15 сек., а частина, що залишилася, за 6 хв. від початку процесу.

Реалізація первинної потужності понад 10% має бути забезпечена з максимальними величинами та швидкістю, що визначаються технічними можливостями генеруючого обладнання.

При цьому коливання частоти мережі можуть вимагати зміни навантаження енергоблока значно більше 10%. Тому крім забезпечення заданої Стандартом ЗПРЧ [1] прийомистості енергоблока при обуренні по навантаженню 10%, до САКП пред'являються додаткові вимоги: система регулювання має забезпечити підтримка технологічних параметрів у заданих межах та недопущення зупину енергоблока при стрибкоподібній зміні завдання навантаження на 20% від встановленої потужності.

4.2.2 Визначення динамічних характеристик об'єкта та розрахунок параметрів КРТ

Для визначення передавальних функцій об'єкта $W_{PH}(s)$, $W_{NH}(s)$, $W_{PF}(s)$, $W_{NF}(s)$, необхідно зняти відповідні перехідні характеристики. На пиловугільному енергоблоці постійно діють досить інтенсивні обурення з боку котла, насамперед пов'язані зі зміною якості палива та режимом його горіння. Тому щоб виділити реакцію об'єкта на обурення завданням навантаження котла F серед дії інших збурень, ступінчаста зміна F повинна бути досить великою (не менше 5%). Навпаки, визначення перехідних характеристик при збуренні регулюючими клапанами турбіни достатньо лише невеликого їх переміщення (1-2%).

Під час експериментів щодо визначення динамічних характеристик енергоблоку технологіями було поставлено умову недопущення відхилення $P't$ від номінального значення більш як на 3 кгс/см². При цьому зберігалася можливість значної зміни N . Для забезпечення цієї умови було ухвалено рішення визначати передавальні функції об'єкта $W_{PF}(s)$ та $W_{NF}(s)$ непрямым

способом при включеному турбінному регуляторі «до себе», що підтримує постійний тиск P'_T . Для цього було проведено такі операції:

1) При відключених котельному та турбінному регуляторі шляхом подачі невеликого обурення на H_T знято перехідні характеристики по каналах $H_T \rightarrow N$ і $H_T \rightarrow P'_T$. Відхилення P'_T від заданого значення $P_{зд}$ залишалось у своїй у межах допустимого;

2) За перехідними характеристиками визначено передавальні функції об'єкта $W_{PH}(s)$ та $W_{NH}(s)$;

3) Увімкнений та налаштований як швидкодіючий турбінний регулятор тиску «до себе»;

4) Шляхом подачі ступінчастого обурення за завданням навантаження котла F величиною 5–6% знято перехідні характеристики каналами $F \rightarrow N$ і $F \rightarrow H_T$ при включеному регуляторі тиску «до себе»;

5) За отриманими у п. 4 перехідними характеристиками визначено передавальні функції у замкнутій системі з турбінним регулятором тиску цими ж каналами $\Phi_{NF}(s)$ і $\Phi_{HF}(s)$;

6) При відомій передавальній функції турбінного регулятора $W_{TRD}(s)$ та передатних функціях $W_{PH}(s)$ і $W_{NH}(s)$ визначені ті, що залишилися шукані передавальні функції об'єкта за формулами:

$$W_{PF}(s) = \Phi_{HF}(s) \frac{1 - W_{PH}(s)W_{TRD}(s)}{W_{TRD}(s)} ; \quad (4.1)$$

$$W_{NF}(s) = \Phi_{NF}(s) - \frac{W_{PF}(s)W_{NH}(s)W_{TRD}(s)}{1 - W_{PH}(s)W_{TRD}(s)} . \quad (4.2)$$

Експериментальні та апроксимуючі криві перехідних характеристик при обуренні H_T показано на рис. 4.1 Отримані в результаті апроксимації передавальні функції об'єкта канали обурення по μ_H описуються формулами:

$$W_{PH}(s) = -4 \left[\frac{0.2}{1+5s} + \frac{0.8}{1+600s} \right]; \quad (4.3)$$

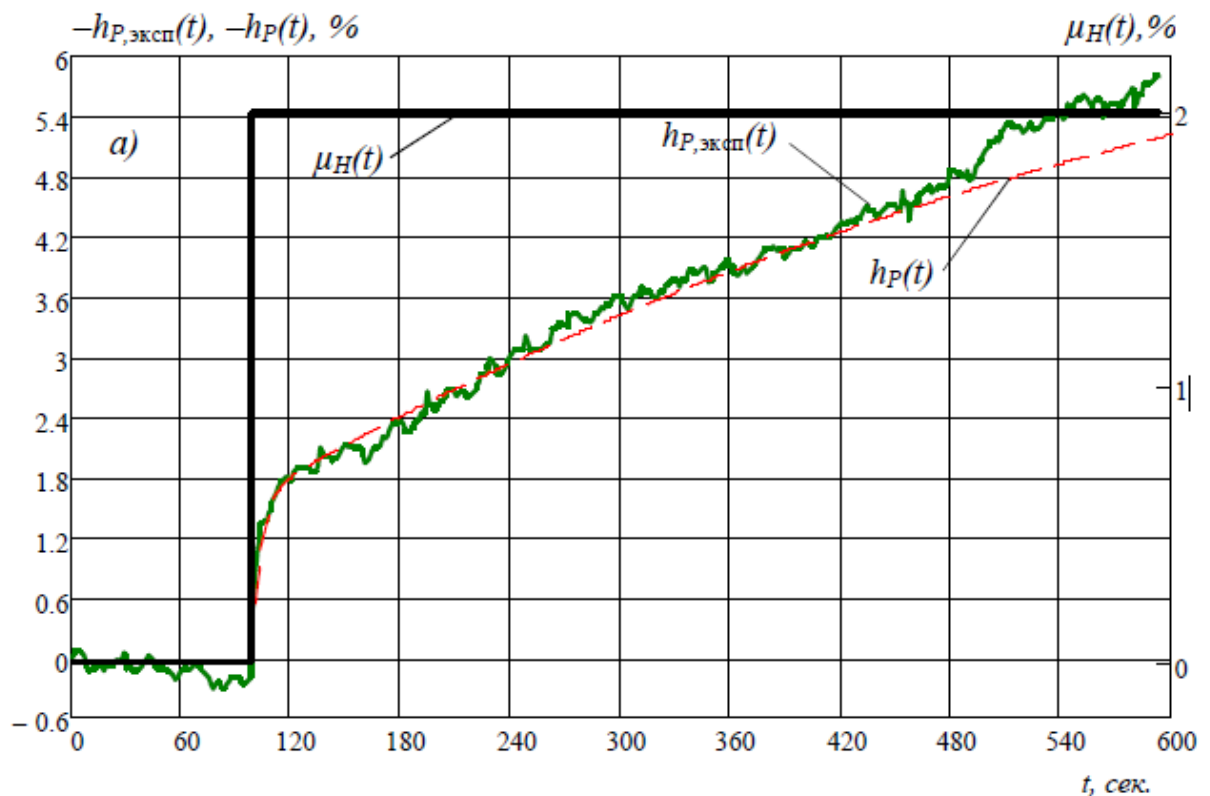
$$W_{NH}(s) = \frac{1.6}{1+10s} \left[1 - \frac{1}{(1+100s)^3} \right]. \quad (4.4)$$

Турбінний регулятор тиску (ТРТ) «до себе» був включений з налаштуваннями: $k_{p,TRD} = 1.6$; $T_{i,TRT} = 7$ сек. Експериментальні та апроксимуючі криві перехідних характеристик при обуренні F і включеному ТРТ показані на рис. 4.2.

Отримані в результаті апроксимації передавальні функції у замкнутій системі через ТРТ «до себе» по каналах обурення по μ_F описуються формулами:

$$\Phi_{HF}(s) = \frac{0.18e^{-15s}}{(1+30s)(1+70s)^2}; \quad (4.5)$$

$$\Phi_{NF}(s) = \frac{0.4e^{-10s}}{(1+20s)(1+80s)^2}. \quad (4.6)$$



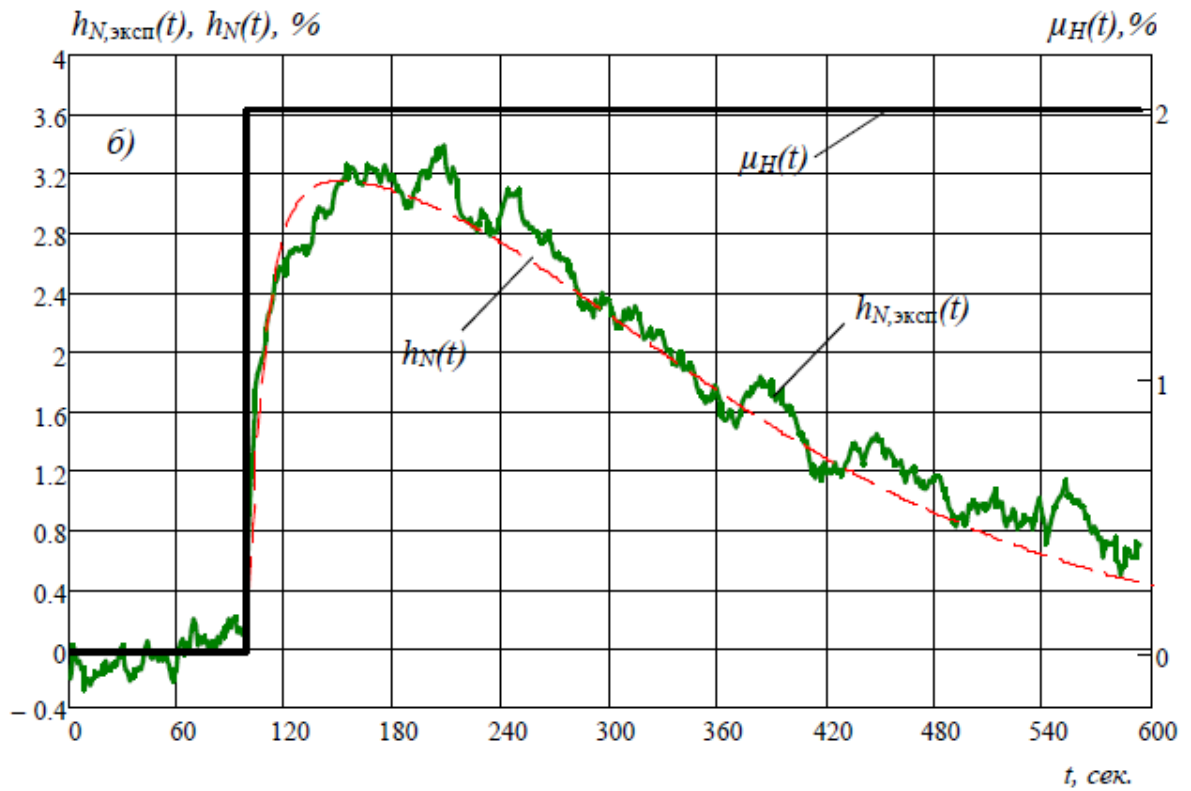
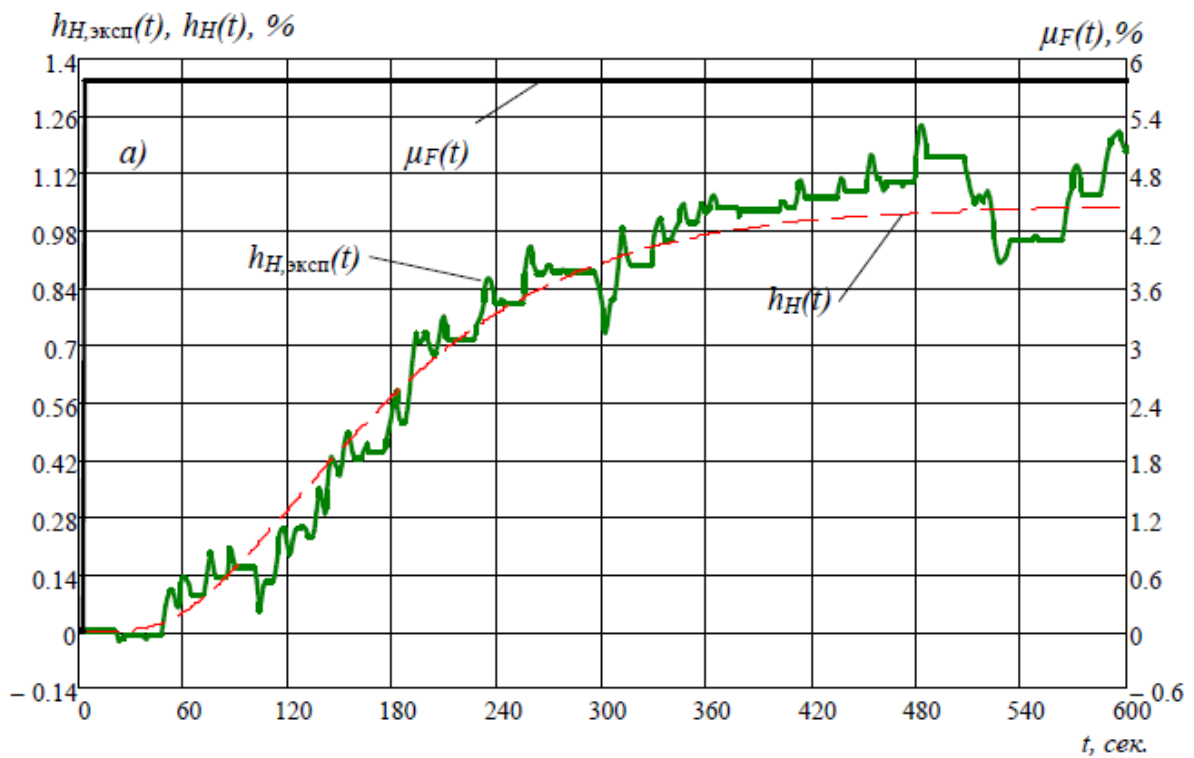


Рис. 4.1. Експериментальні та апроксимуючі перехідні характеристик об'єкта САКП бл. 9 Курахівської ТЕС під час збурення $\mu_H(Nt)$:
а) за тиском пари перед турбіною $y_P(P'T)$;
б) по навантаженню енергоблока $y_N(N)$



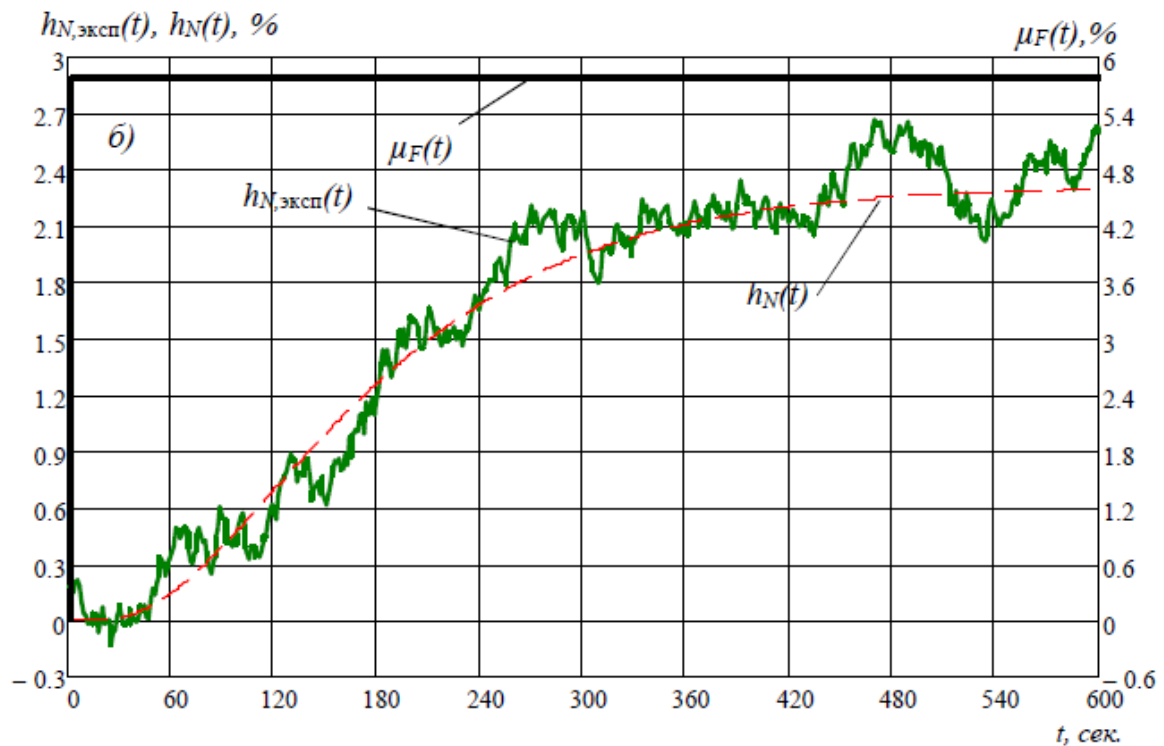


Рис. 4.2. Експериментальні та апроксимуючі перехідні показники об'єкта САКП бл. 9 Курахівської ТЕС під час обурення $\mu_F(F)$ та включеному ТРТ «до себе»: а) за положенням регулюючих клапанів турбіни $\mu_N(Нт)$; б) по навантаженню енергоблоку $y_N(N)$

На рис. 4.2 і 4.3 показаний розрахунок налаштувань КРТ з передвімкненим диференціатором у програмному пакеті Mathcad для схеми, побудованої відповідно до рис. 2.2.

На початку розрахунку за формулами (4.3) та (4.4) визначаються передавальні функції $W_{PF}(s)$, $W_{NF}(s)$. Визначати вид цих передавальних функцій у явному вигляді немає потреби, проте для контролю правильності апроксимацій та розрахунків побудовано відповідні їм перехідні характеристики. Як і очікувалося, вони мають вигляд інерційних ланок з запізненням, причому реакція об'єкта по каналу $\mu_F \rightarrow y_N$ дещо відстає від реакції по каналу $\mu_F \rightarrow y_P$, що пояснюється додатковою інерційністю, яка виникає в проміжному пароперегрівачі та в турбогенераторі.

Далі розрахунок ведеться описаним раніше методом і не відрізняється від представленого на рис. 2.4 та 2.5.

Для правої частини виразу, що визначає величину максимально допустимої одноразової зміни регулюючого впливу при максимально можливому відхиленні регульованої величини, прийнято значення 5%/ (при максимально допустимому ступінчастому відхиленні гострого тиску пари $y_{Pmax} = 10\%$ максимально допустима ступінчаста дія на задатчик витрати палива $\mu_{Fmax} = 50\%$):

$$k_p(T_\Phi) \cdot [1 + k_d(T_\Phi)] = \frac{\mu_{Fmax}}{y_{Pmax}} = 50\% \frac{1}{10} \% \approx 5 \quad (4.7)$$

Для виконання умови (4.7) були прийнято додаткові обмеження за максимально можливими значеннями коефіцієнтів передачі та диференціювання $k_{p,max}$ та $k_{d,max}$ – див. початок розрахунку на рис. 4.3.

В результаті розрахунку отримано наступні параметри налаштування КРТ: $k_{p,KPT} = 1.3$, $T_{i,KPT} = 91$ сек., $k_d = 2.93$, $T_\Phi = 120$ сек.

Область заданого запасу стійкості для КРТ при отриманих k_d та T_Φ показано внизу рис. 4.3. Значення вибраного $k_{p,KPD}$ на межі запасу стійкості відзначено червоним хрестом. Воно задовольняє умові (4.7) при заданому k_d і нижче оптимального значення $k_{p,KPT}$, яке можна було б встановити при відсутність обмежень.

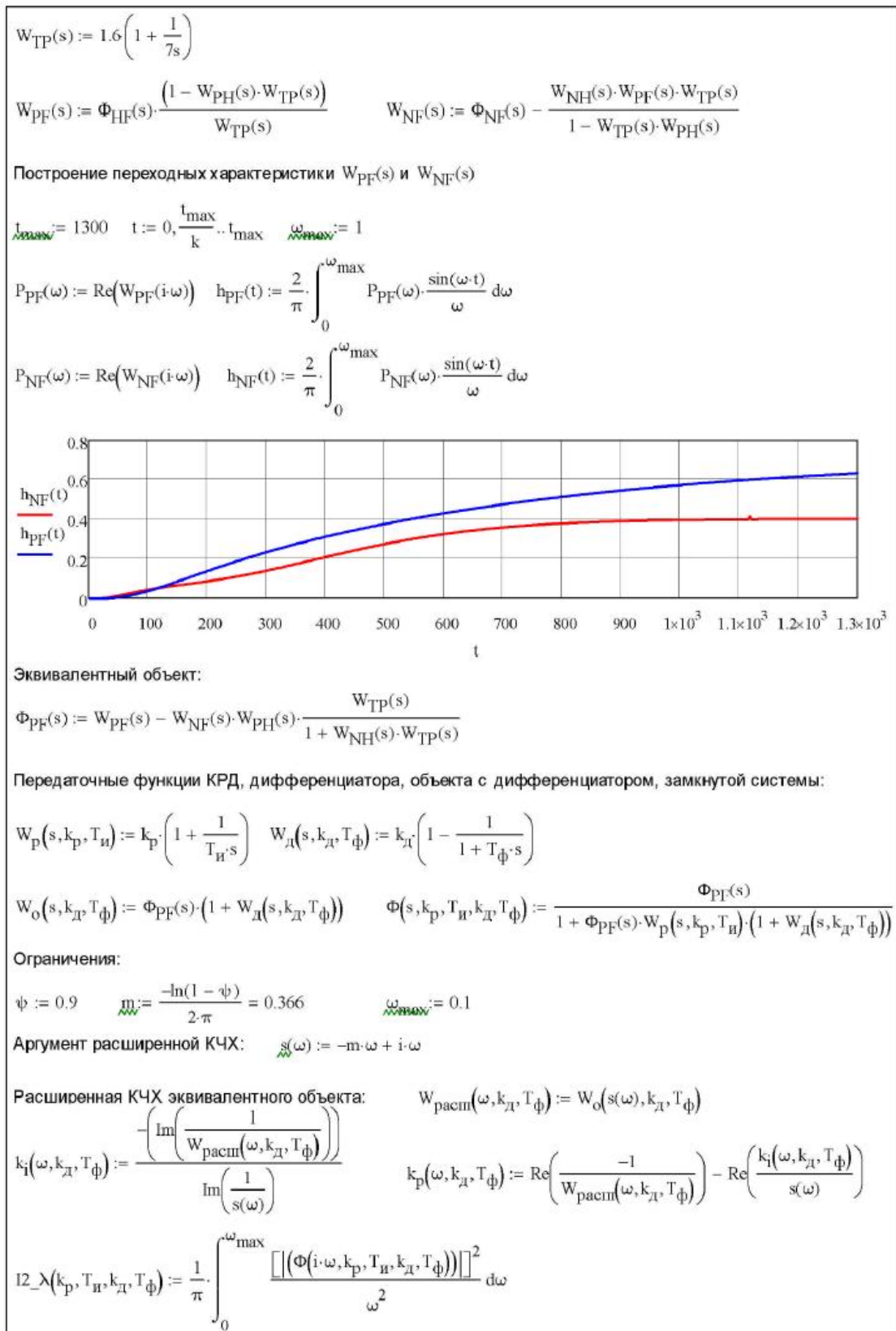


Рис. 4.3. Mathcad-документ. Розрахунок КРТ з передвмкненим диференціатором у складі САКП бл. 9 Курахівської ТЕС (початок)

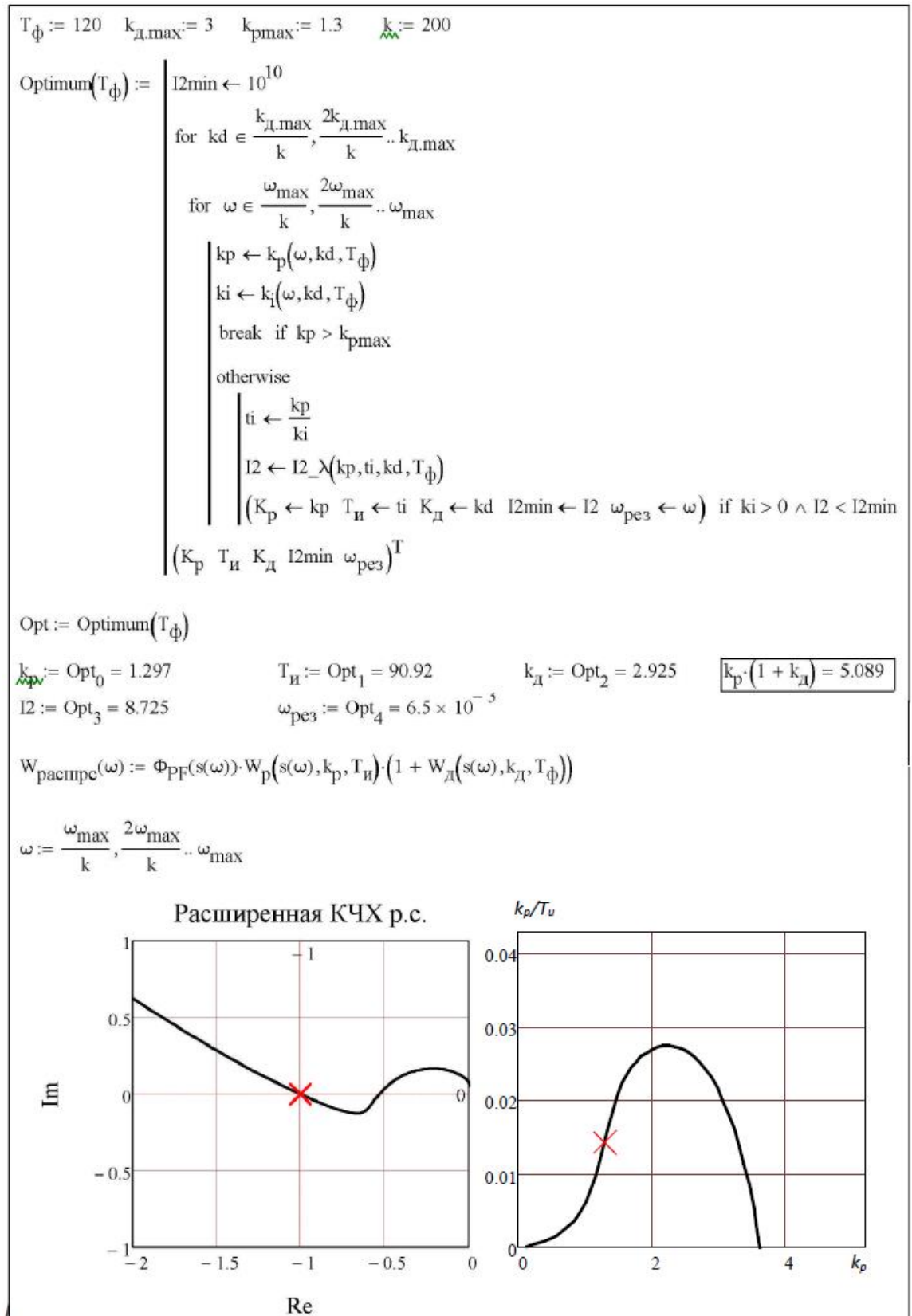


Рис. 4.3. Mathcad-документ. Розрахунок КРТ з передвiмкненим диференціатором у складі САКП бл. 9 Курахівської ТЕС (кінець)

4.2.3 Графіки процесів регулювання та їх аналіз

Після включення ТРП та КРТ у складі САКП із розрахованими параметрами налаштування для контролю їхньої роботи було завдано ступінчастих збурень задатчиком $P_{зд}$ – див. рис. 4.4. Збурення наносилися о 18:20 ($\Delta P_{зд} = -5 \text{ кгс/см}^2$) та 18:34 ($\Delta P_{зд} = +5 \text{ кгс/см}^2$). В обох випадках КРТ забезпечив перехід Р'т зі ступенем згасання, близьке до заданої.

Після перевірки якості роботи КРТ під час обурення завданням $\Delta P_{зд}$ були проведено випробування всієї САКП щодо задоволення умов готовності до ОПРЧ [2], а також додаткових вимог, пов'язаними з недопущенням зупинки обладнання при великих збурення за частотою мережі.

На рис. 4.5 показаний перехідний процес в САКП при зміні завдання навантаженні вниз на 10% встановленої потужності ($\Delta N_{зд} = -22.5 \text{ МВт}$). Енергоблок вийшов на нову задану потужність приблизно за 30 сек (при необхідних 6 хв.), а половина зміни N відбулася за 15 сек (із запасом відповідає вимогам [1-2]). Такий самий дослід було проведено при збуренні $N_{зд}$ вгору (див. рис. 4.6). У цьому експерименті РК турбіни повністю відкрилися в початковий період перехідного процесу (приблизно з 11:21 до 11:24). При цьому зникла технологічна можливість реалізації акумульованого в котлі тепла для швидше зміни навантаження блока. Тим не менш, перехід на задане навантаження відбулося за 3.5 хвилини, а половина зміни N відбулася за 15 сек, що із запасом відповідає вимогам [1].

Випробування САКП на відповідність додатковим вимогам при екстремальній зміні частоти проводилися в 2 етапи. Спочатку було подано обурення завдання за потужністю вгору та вниз на 15% від встановленої ($\Delta N_{зд} = +33.75 \text{ МВт}$) – див. рис. 4.6. Потім – вгору та вниз на 20% від встановленої потужності ($\Delta N_{зд} = +45 \text{ МВт}$) – див. рис. 4.7. У всіх випадках перехідні процеси відбувалися із заданим запасом стійкості, основні технологічні параметри знаходились у межах допустимих значень, а максимальний час

переходу енергоблока на нове задане навантаження навіть при 20% обуренні заданої потужності та дії технологічних обмежень не перевищувало 6 хв.

На рис. 4.8 представлений добовий графік зміни технологічних параметрів під дією САКП при плановій зміні потужності. Відхилення поточного навантаження енергоблока N від заданої $N_{зд}$ становить не більше 1 МВт, а відхилення тиску гострої пари перед турбіною $P'_т$ від заданого $P_{зд}$ – не більше 2.5 кгс/см².

За результатами випробувань, а також пасивних спостережень за підтримкою технологічних параметрів в автоматичному режимі було зроблено висновок про те, що САКП бл. 9 Курахівської ТЕС із запасом відповідає пред'явленим до неї вимогам.

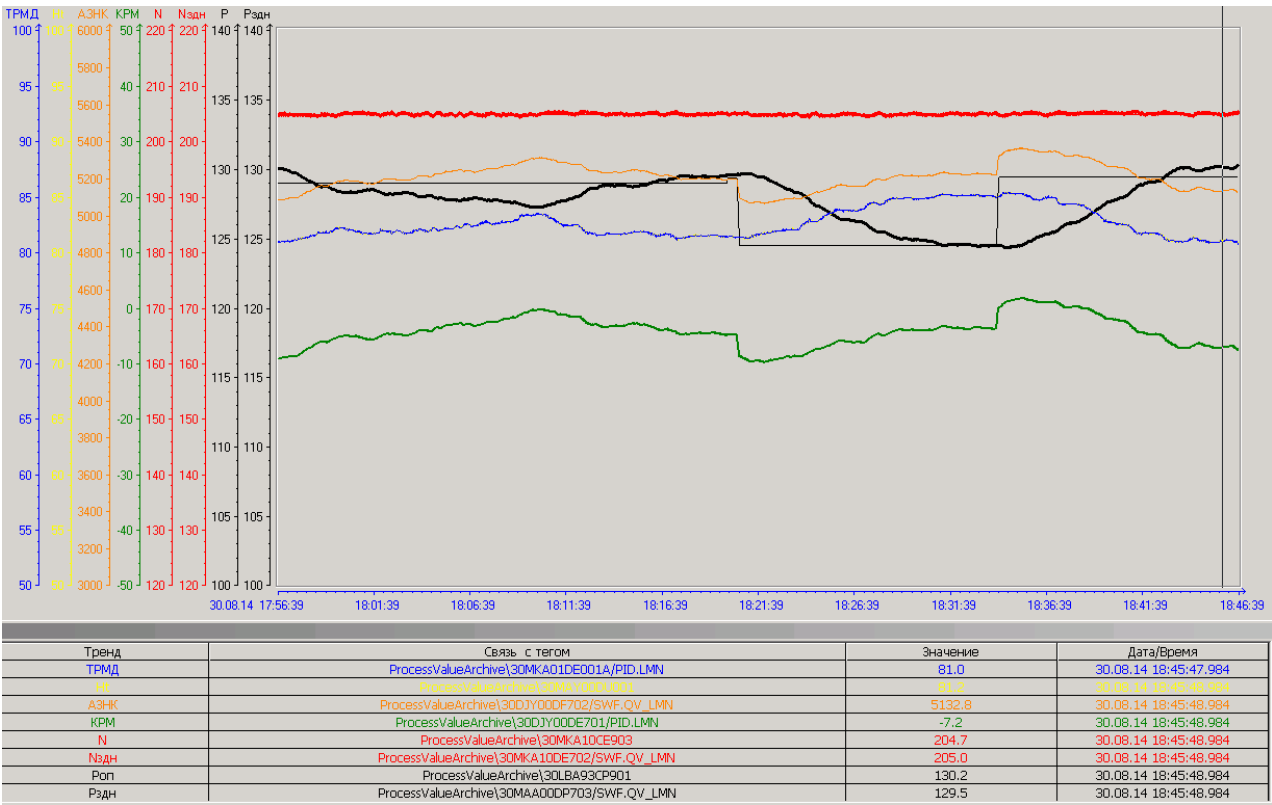


Рис. 4.4. Курахівська ТЕС, бл. 9. Випробування КРТ у складі САКП
нанесення ступінчастих збурень $\Delta P_{зд} = +5$ кгс/см²

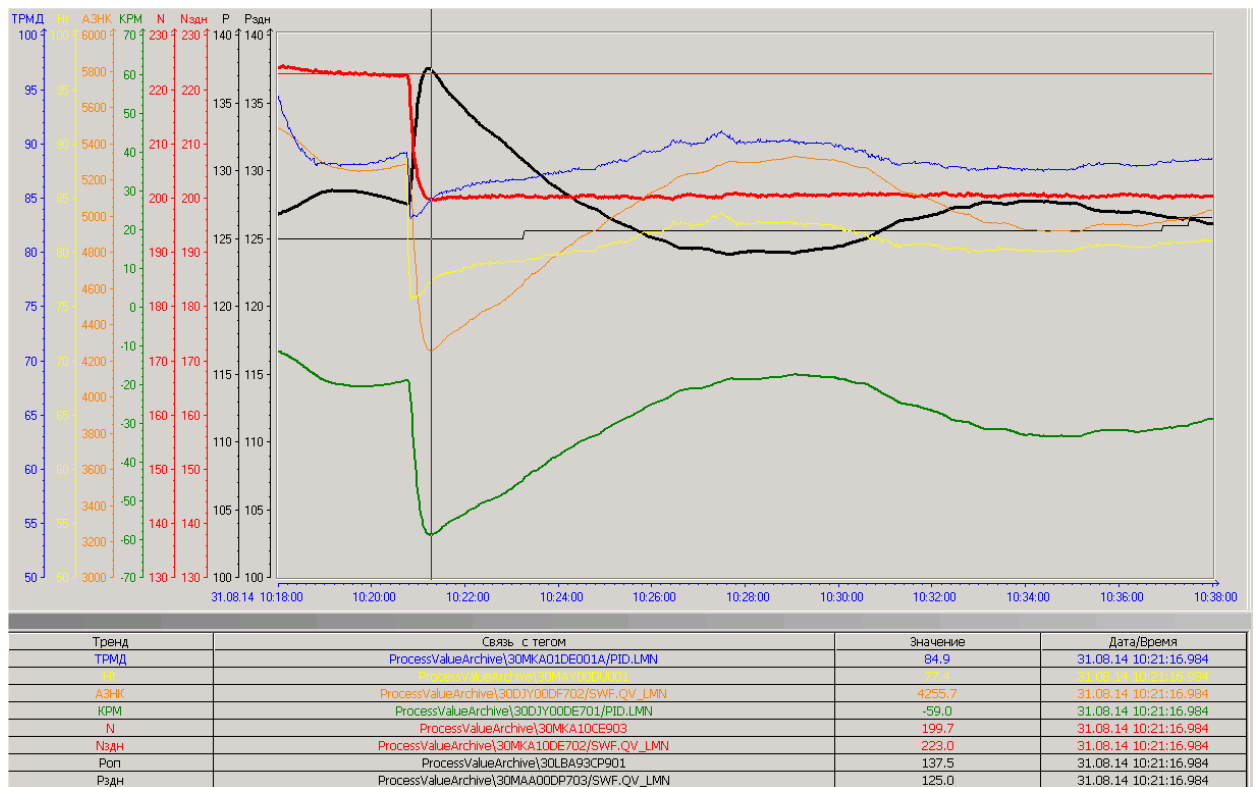


Рис. 4.5. Курахівська ТЕС, бл. 9. Випробування САКП. Ступінчасте збурення

$$\Delta N_{зд} = -22.5 \text{ МВт}$$

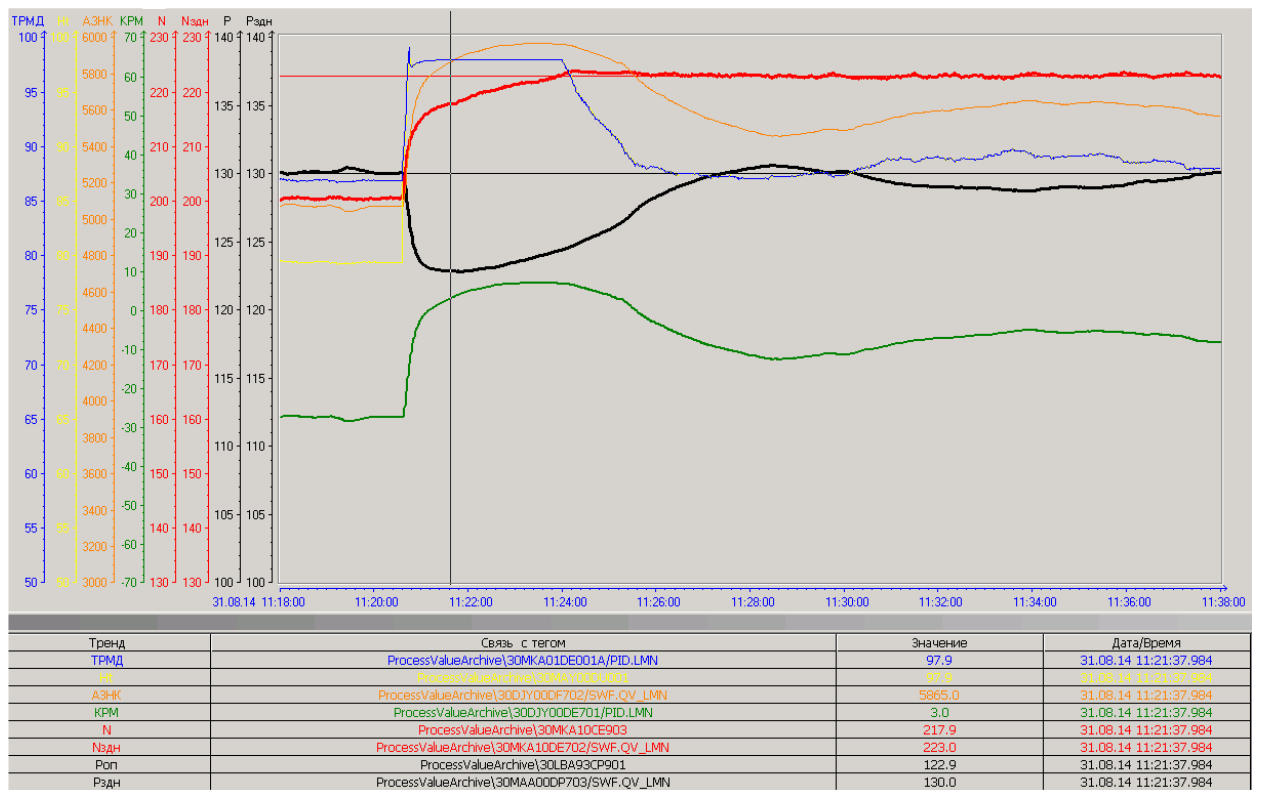


Рис. 4.6. Курахівська ТЕС, бл. 9. Випробування САКП. Ступінчасте збурення $\Delta N_{зд} = +22.5 \text{ МВт}$

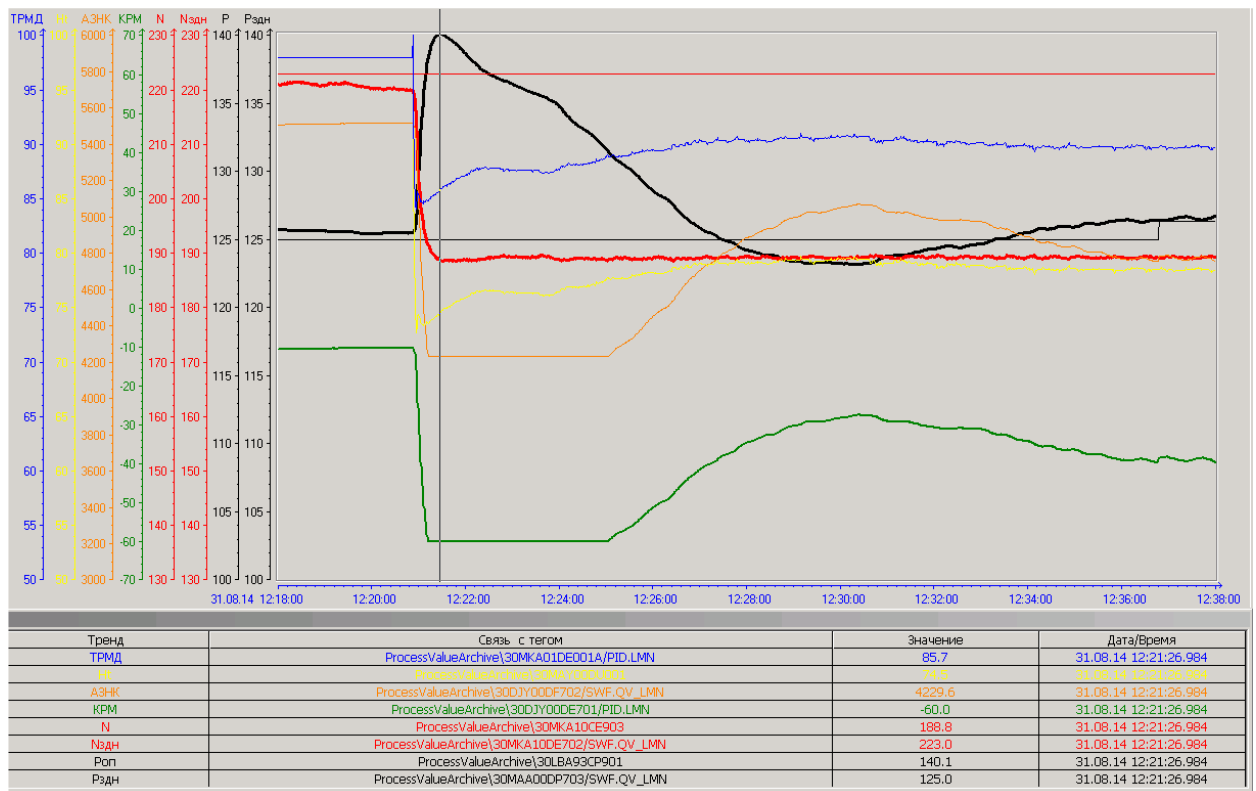


Рис. 4.7. Курахівська ТЕС, бл. 9. Випробування САКП. Ступінчасте збурення

$$\Delta N_{зд} = -33.75 \text{ МВт}$$

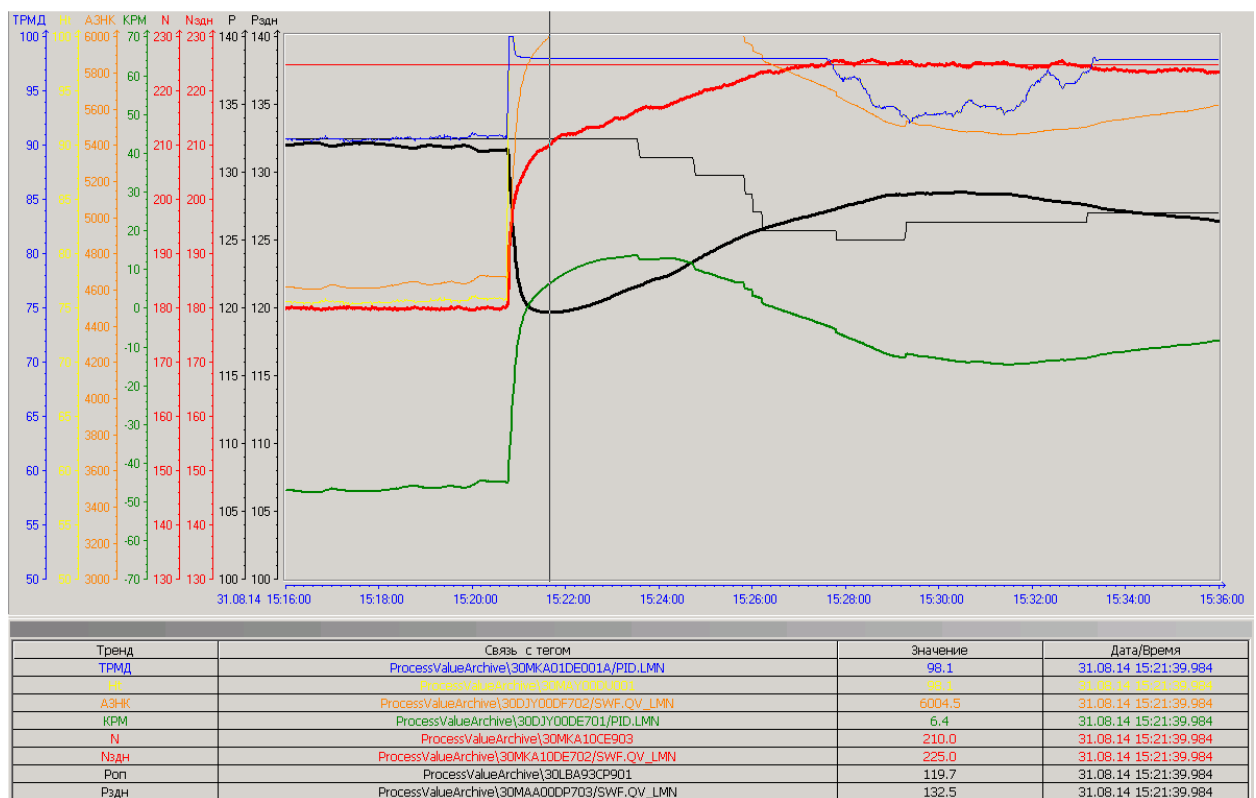


Рис. 4.8. Курахівська ТЕС, бл. 9. Випробування САКП. Ступінчасте обурення

$$\Delta N_{зд} = +45 \text{ МВт}$$

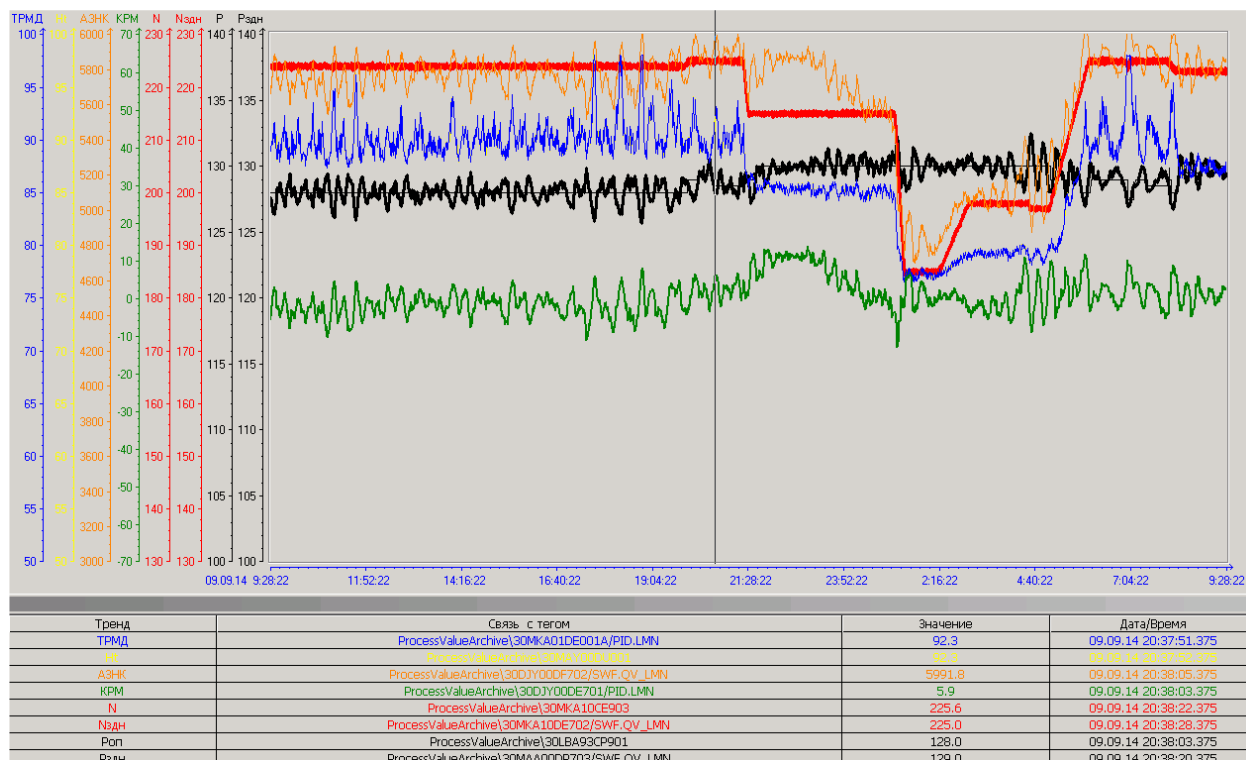


Рис. 4.8. Курахівська ТЕС, бл. 9. Добовий графік зміни технологічних параметрів у САКП

4.3. Впровадження САКП енергоблока з прямоточним пилувугільним котлом ст. №3 325 МВт Запорізької ТЕС

4.3.1. Технологічний об'єкт управління, вимоги до САКП

Енергоблок ст. №3 325 МВт Запорізької ТЕС складається з пилувугільного прямоточного котла типу ТПП-312А виробництва ВАТ ТКЗ «Червоний котельник», конденсаційної парової турбіни типу К-325-23,5-2 виробництва ВАТ «Турбоатом» та допоміжного обладнання.

Енергоблок працює на постійному номінальному тиску $P'_t = 240 \text{ кгс/см}^2$ (це значення може змінюватися оператором за допомогою задатчика $P_{зд}$). За технологічним вимогам відхилення P'_t у всіх режимах має бути в діапазоні $226 \text{--} 255 \text{ кгс/см}^2$ від $P_{зд}$. Для недопущення виходу P'_t за вказані межі в ТРП передбачені відповідні «стерезучі» регулятори.

САКП повинна відповідати вимогам до систем регулювання енергоблоків, що беруть участь у НПРО, чинним в Україні [1]. При відхиленні частоти, що викликає необхідність зміни навантаження енергоблока на 5%, не менше половини цієї зміни має бути забезпечено за час не більше 15 сек., а вся зміна має бути забезпечено за 30 сік. При реалізації 10%-ної зміни первинної потужності, щонайменше 70% необхідної зміни має бути забезпечено за час не більше 30 сек., а вся зміна має бути забезпечена за 5 хв.

4.3.2 Визначення динамічних характеристик об'єкта та розрахунок параметрів КРТ

На відміну від енергоблока з барабанним котлом, під час зняття динамічних характеристик допускаються значні відхилення і N , і P'_T . Тому передатні функції об'єкта $W_{PH}(s)$, $W_{NH}(s)$, $W_{PF}(s)$, $W_{NF}(s)$ визначалися безпосередньо, шляхом зняття та апроксимації перехідних характеристик по відповідним каналам при обуреннях регулюючими клапанами турбіни H_T та завданням навантаження котла F при відключених ТРП та КРТ.

Експериментальні та апроксимуючі криві перехідних характеристик при обуренні H_T показано на рис. 4.9

Отримані в результаті апроксимації передавальні функції об'єкта канали обурення по μ_H описуються формулами:

$$W_{PH}(s) = -0.45 \left[\frac{0.3}{1+10s} + \frac{0.7}{(1+30s)^3} \right]; \quad (4.8)$$

$$W_{NH}(s) = \frac{0.18}{1+10s} \left[1 - \frac{1}{(1+10s)^5} \right]. \quad (4.9)$$

Експериментальні та апроксимуючі криві перехідних характеристик, при збуренні F на рис. 4.10.

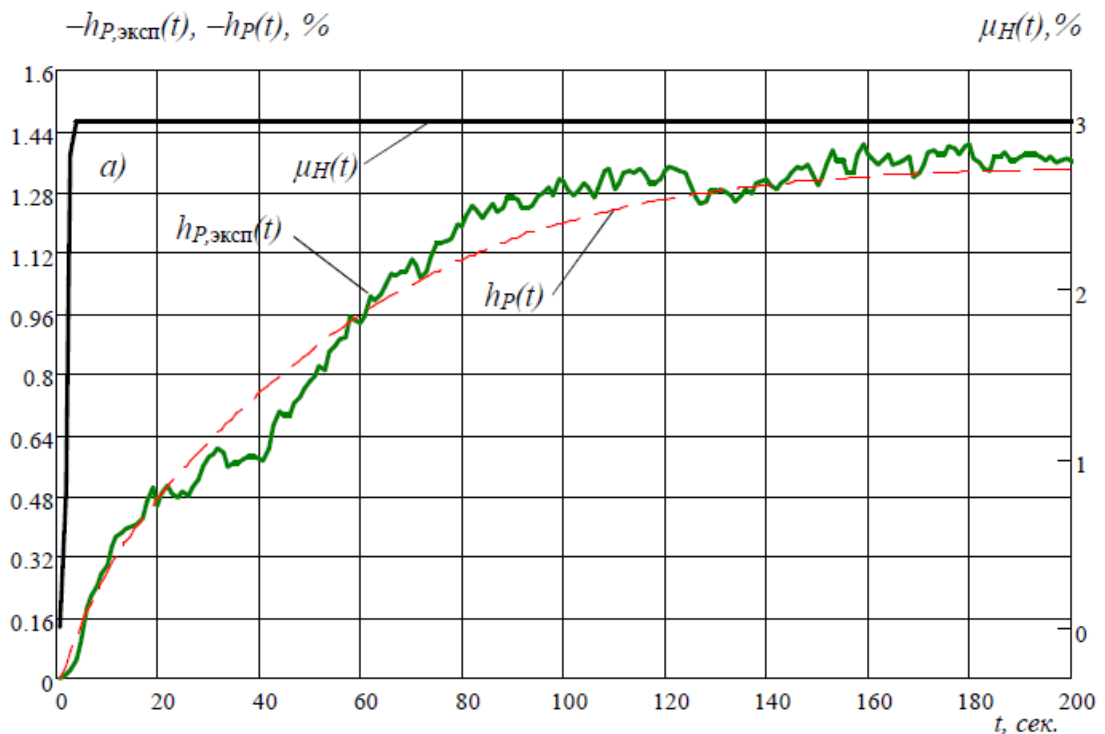
Отримані в результаті апроксимації передавальні функції об'єкта канали збурення по μ_F описуються формулами:

$$W_{PF}(s) = 0.21 \frac{e^{-40s}}{(1+60s)^3}; \quad (4.10)$$

$$W_{NF}(s) = 0.17 \frac{e^{-60s}}{(1+30s)(1+60s)}. \quad (4.11)$$

Далі розрахунок проводився методом, описаним вище. Він не відрізняється від представленого на рис. 2.4 та 2.5, за винятком того, що був застосований лінійний I , а чи не квадратичний I^2 інтегральний критерій. При цьому на ТРП були встановлені такі настройки: $k_{p,TRM} = 0.7$; $T_{i,TRM} = 10$ сек.

В результаті розрахунку отримано наступні параметри налаштування КРТ: $k_{p,KPT} = 2.0$, $T_{i,KPT} = 120$ сек., $k_d = 3.46$, $T_\phi = 27$ сек. Відповідна область заданого запасу стійкості показано на рис. 4.11.



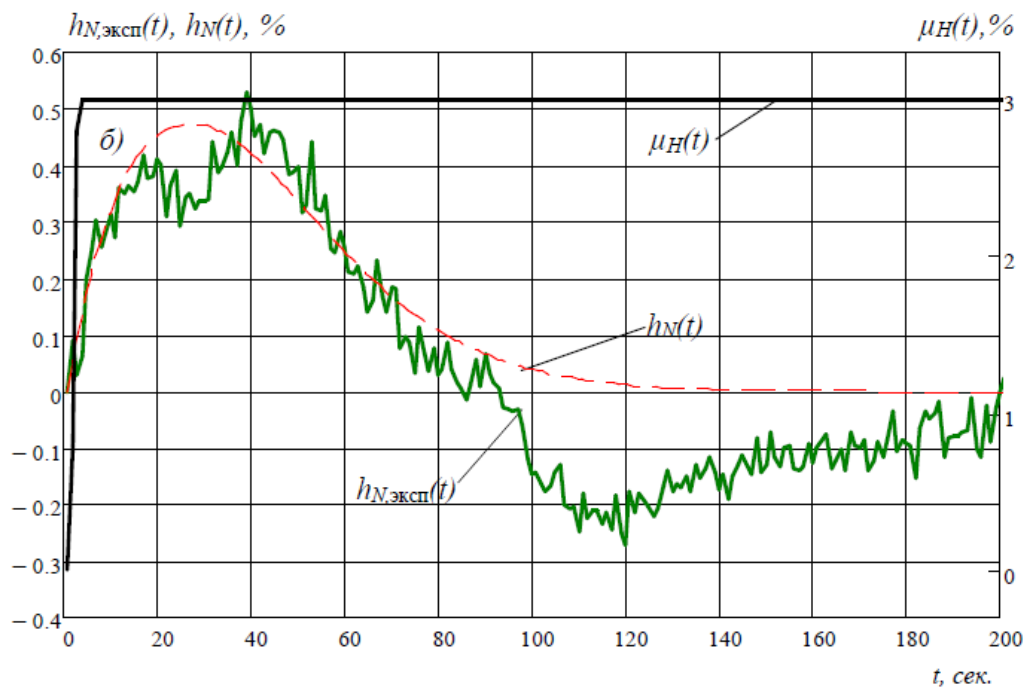
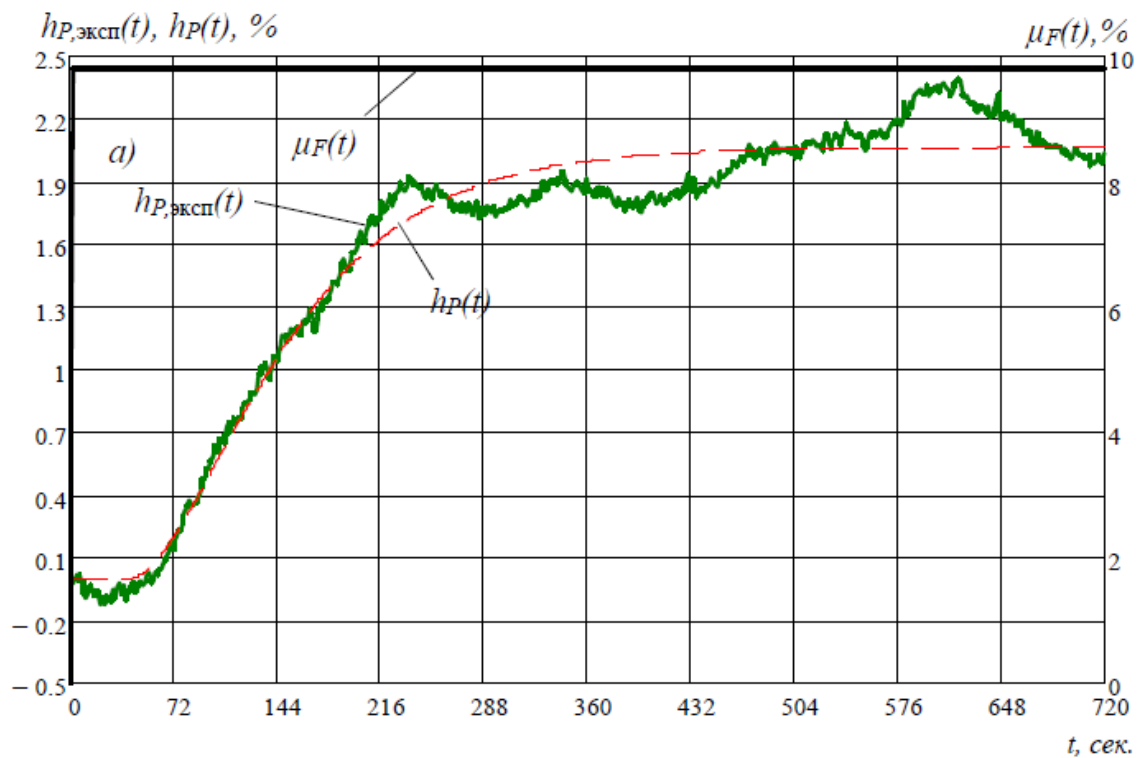


Рис. 4.9. Експериментальні та апроксимуючі перехідні показники об'єкта САКП бл. 3 Запорізької ТЕС під час обурення $\mu_H(H_T)$: а) за тиском пари перед турбіною $y_P(P'_T)$; б) по навантаженню енергоблоку $y_N(N)$



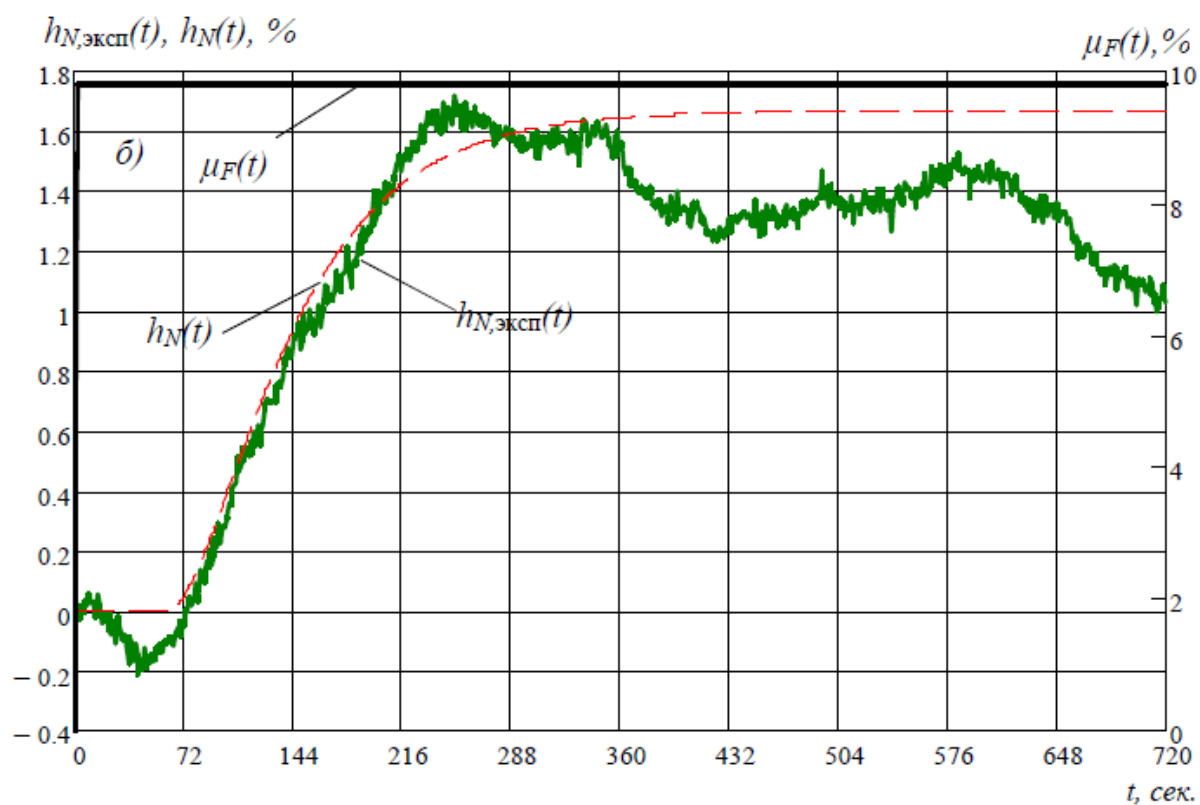


Рис. 4.10. Експериментальні та апроксимуючі перехідні показники об'єкта САКП бл. Запорізькій ТЕС під час обурення $\mu_F(F)$: а) по тиску пари перед турбіною $y_P(P'_T)$; б) по навантаженню енергоблоку $y_N(N)$

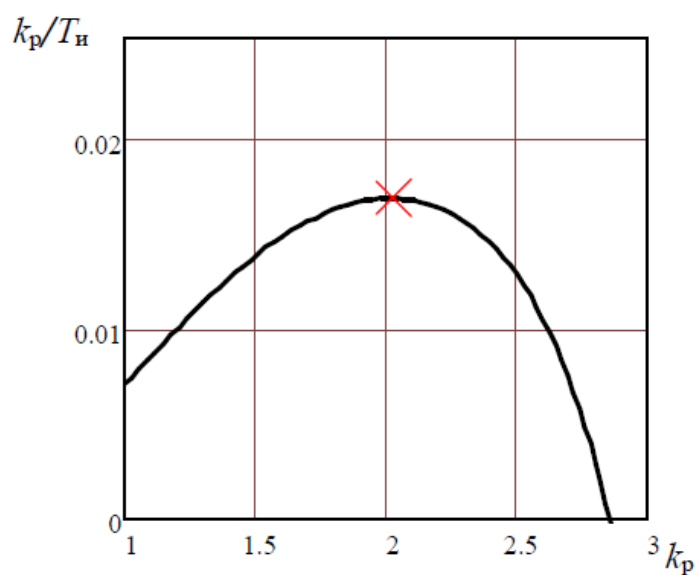


Рис. 4.11. ОЗЗ КРТ у САКП бл.3 Запорізької ТЕС

4.3.3 Графіки процесів регулювання та їх аналіз

На рис. 4.12 та 4.13 представлені перехідні процеси в САКП з розрахованими параметрами налаштування при зміні $N_{зд}$ на 5% та 10% від встановленої потужності. Збурення завдавалися за допомогою імітатора коректора частоти. Для того, щоб задовольнити вимоги [1], але в той же час уникнути зайвого форсування ТРП, вихід коректора частоти, що бере участь у формуванні $N_{зд}$, при 10%-му обуренні (див. рис. 4.13) згладжується аперіодичною ланкою. При збуреннях з боку коректора частоти, відповідних змін навантаження до 5%, вихід коректора частоти проходить на $N_{зд}$ безпосередньо без згладжування, тобто ступінчастої зміни виходу коректора частоти відповідає ступінчасту зміну $N_{зд}$ (див. рис. 4.12).

В обох випадках перехідні процеси по P'_T проходили із заданим ступенем згасання. Відхилення P'_T не вийшло за допустимі межі (кордони стерегучого регулятора).

На рис. 4.14 показаний графік зміни технологічних параметрів у САКП за 8 годин при плановій зміні $N_{зд}$ та дії збурень з боку котла, пов'язаних із режимом горіння. При зміні $N_{зд}$ у діапазоні 170 - 320 МВт відхилення P'_T від заданого $P_{зд}$ не перевищують 5 кгс/см², а при постійному навантаженні - не більше 2.5 кгс/см². Відхилення N від $N_{зд}$ у всіх режимах не перевищує 2 МВт.

Відхилення температури гострої пари від заданої у всіх режимах не перевищує 5°C.

Таким чином, САКП бл.3 Запорізької ТЕС повністю задовольняє вимогам до неї [1].

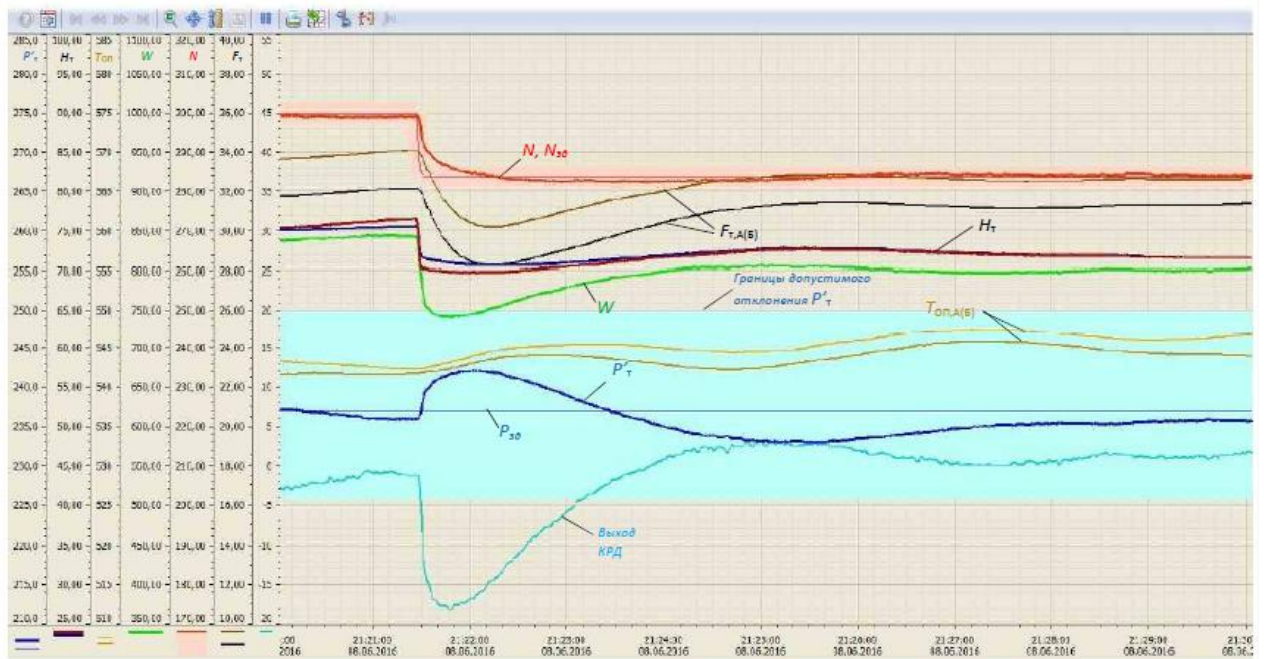


Рис. 4.12. Запорізька ТЕС, бл. 3. Випробування САКП. Ступінчасте обурення $\Delta N_{зд} = -16$ МВт (5%)



Рис. 4.13. Запорізька ТЕС, бл. 3. Випробування САКП. Ступінчасте обурення $\Delta N_{зд} = -32$ МВт (10%)

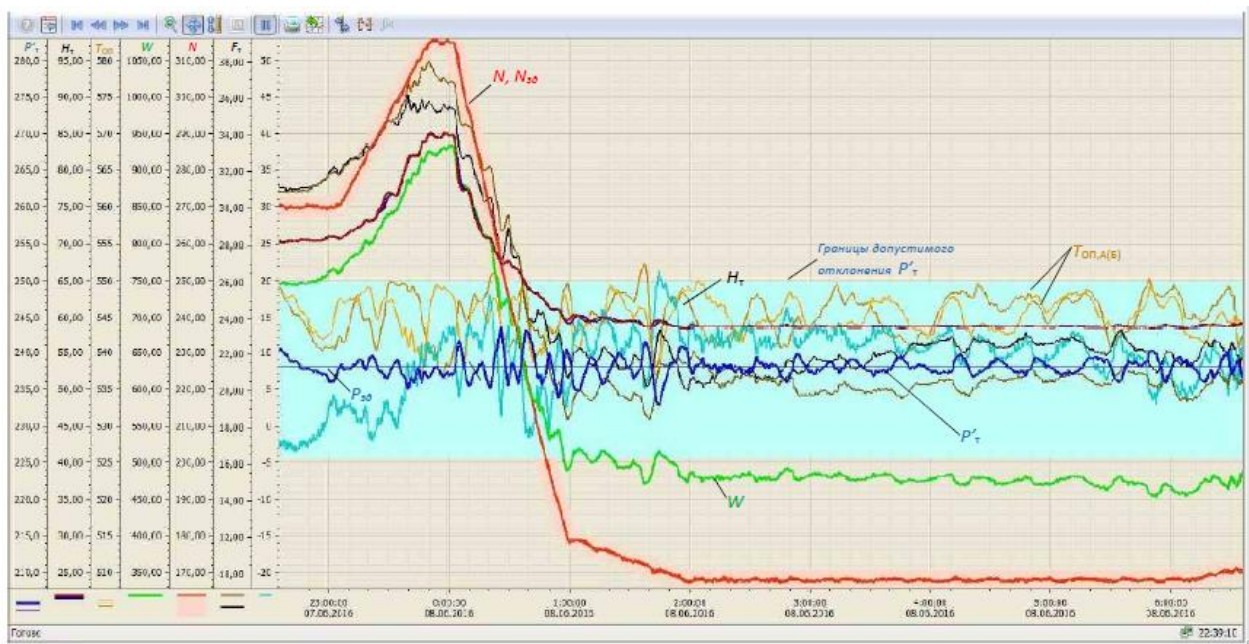


Рис. 4.14. Запорізька ТЕС, бл. 3. Графік зміни технологічних параметрів у САКП за 8 годин

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд застосовуваних схем систем автоматичного керування потужністю (САКП).

2. Проаналізовано застосування схеми САКП із котельним ПП-регулятором тиску пари з передвімкненим диференціатором та незалежним турбінним ПП-регулятором потужності (схеми з ведучою турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ).

3. Проведено оцінку методу розрахунку параметрів налаштування схеми САКП з передвключеним диференціатором на КРТ.

3. Виконано порівняльний аналіз якості процесів регулювання у різних схемах САКП при їх налаштуванні за однаковими критеріями та при однакових обмежень.

4. Розглянуто експериментальне дослідження САКП з провідною турбіною та передвімкненим диференціатором на КРТ на електростанціях України.

Рекомендується застосування схеми САКП з котельним ПП-регулятором тиску пари з передвімкненим диференціатором та незалежним турбінним ПП-регулятором потужності та запропонованим методом розрахунку параметрів налаштування. Практика проектування, налагодження та експлуатації підтвердила ефективність зазначених схем.

У роботі доведено, що для підтримання заданого навантаження енергоблока при збереженні заданої якості регулювання тиску пари перед турбіною найбільш ефективною по сукупності показників якості є схема з провідною турбіною та передвключеним диференціатором на КРТ з розрахунком її параметрів налаштування відповідно до запропонованої методики.