

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ (ТЕС) ЯК ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

М.В. Шавранський

*ІФНТУНГ; м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,
e-mail: kafatp@ukr.net*

На підставі аналізу теплоенергетичних процесів проведено моделювання та ідентифікацію основних блоків ТЕС з метою підвищення ефективності роботи та надійності функціонування систем автоматичного регулювання інерційних контурів котлоагрегатів ТЕС, що забезпечує зниження чутливості систем до невизначеностей параметрів самого об'єкта, зовнішніх збурень, зміни запізнювання у часі по каналах керування і збурення, та гарантує при цьому задану якість регулювання у маневрових режимах роботи. Досліджені функції передачі (структури моделі) легко реалізуються програмно-технічним шляхом і не вимагають для своєї реалізації додаткової регулюючої апаратури, додаткових каналів вимірювання сигналів або спеціальних датчиків.

Ключові слова: ідентифікація, моделювання, функція передачі, котлоагрегат, перехідна характеристика, коефіцієнт підсилення, стала часу, запізнення, канали регулювання.

По результатам анализа теплоэнергетических процессов проведены моделирование и идентификация основных блоков ТЭС с целью повышения эффективности работы и надежности функционирования систем автоматического регулирования инерционных контуров котлоагрегатов ТЭС, обеспечивает снижение чувствительности систем к неопределенности параметров самого объекта, внешних возмущений, изменение запаздывания во времени по каналам управления и возмущения, и гарантирует при этом заданное качество регулирования в маневренных режимах работы. Исследованы функции передачи (структуры модели) легко реализуемые программно-техническим путем, которые не требуют для своей реализации дополнительной регулирующей аппаратуры, дополнительных каналов измерения сигналов или специальных датчиков.

Ключевые слова: идентификация, моделирование, функция передачи, котлоагрегат, переходная характеристика, коэффициент усиления, постоянная времени, опоздания, каналы регулирования.

On the basis of the analysis of the heat and power processes, the modeling and identification of the main units of the TPP has been carried out in order to increase the efficiency and reliability of the functioning of the automatic control systems of the inertial circuits of the TPP boiler units, which ensures the system's reduction in sensitivity to uncertainties of the object itself, external perturbations, time delay variations along the control channels and disturbance, and thus guarantees the given quality of regulation in maneuverable modes of operation. The investigated transfer functions (model structure) are easily implemented by software and do not require additional control equipment, additional signal measurement channels or special sensors for their implementation.

Key words: identification, modeling, transfer function, boiler unit, transient characteristic, gain coefficient, time constant, delay, control channels.

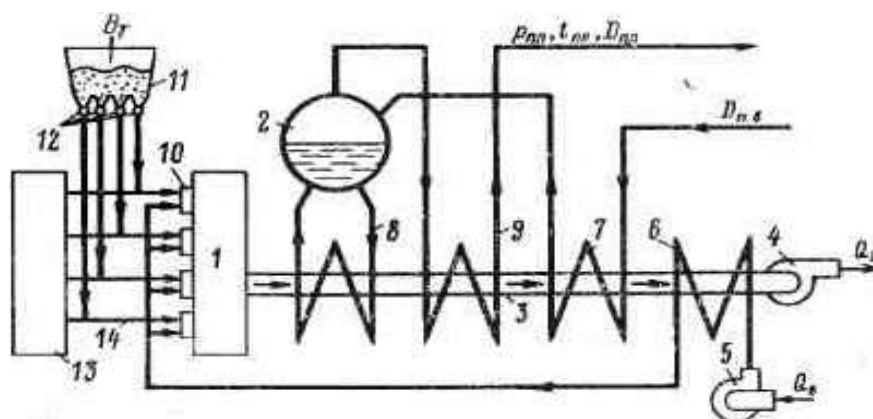
Вступ. Теплові електричні станції (ТЕС) є складовою частиною об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, на якій припадає значна частина встановленої потужності та відповідна кількість виробленої електроенергії. В структурі генеруючих потужностей компонентів ОЕС виявлена диспропорція між об'єктами, що можуть працювати в базовому, напівпіковому та піковому режимах [1, 2]. Енергоблоки ТЕС використовуються в даний момент часу у непроектованих режимах для покриття пікових навантажень, що прискорює їх зношування.

Термінова модернізація об'єктів теплової генерації та створення маневрових потужностей стає важливим завданням, без виконання якого Україна може втратити здатність самостійно регулювати роботу енергосистеми, а також ризикує перетворитися з експортера на імпортера електроенергії [3-6].

Аналіз існуючого стану. Розвідані запаси вихідної сировини для основних технологічних процесів об'єктів теплової енергетики, які використовують переважно для отримання електричної та теплової енергії кам'яне вугілля та природний газ, є скінчені, але для вугілля вони становлять до 450 років при теперішніх об'ємах споживання, а для природного газу – на порядок менше.

Технологічні процеси ТЕС включають: розмелювання кам'яного вугілля, його спалювання, отримання перегрітої водяної пари заданого тиску і температури, а також розширення її у паровій турбіні та отримання електричної енергії за допомогою потужних генераторів.

Одним із найбільших, і водночас дуже важливим та ключовим блоком на тепловій електростанції є котельний агрегат, який визначає ефективність функціонування всього циклу парової генерації електричної енергії. Типовий котельний агрегат складається із бункера вугі-



1 – паливня, 2 – барабан, 3 – газохід, 4 – димовий вентилятор, 5 – вентилятор повітря на процес спалювання, 6 – підігрівач повітря, 7 – водяний економайзер, 8 – циркуляційний контур, 9 – пароперегрівник, 10 – пальники котла, 11 – бункер вугільного пилу, 12 – вугільні живильники, 13 – короб первинного повітря, 14 – трубопроводи вугільного пилу

Рисунок 1 – Принципова технологічна схема котельного агрегату з пиловугільним блоком

льного пилу, палива та парогенератора, які є складними динамічними системами із розподіленими параметрами.

Об'єкти теплової енергетики схематично можна зобразити як пристрій з декількома вхідними та вихідними величинами та розглядати як спрощену фізичну модель реального об'єкта. Сукупність математичних залежностей у вигляді алгебраїчних або диференціальних рівнянь, що описують взаємозв'язки між вхідними та вихідними величинами розглядають як математичну модель. При складанні математичних моделей теплових об'єктів використовують моделі із зосередженими та розподіленими теплофізичними параметрами.

Принципову схему котельного агрегату із пиловугільним блоком наведено на рис. 1.

Аналітичне визначення статичних і динамічних характеристик таких систем шляхом складання диференціальних рівнянь пов'язане з великим об'ємом розрахункових та дослідницьких операцій.

Отримання математичних моделей аналітичними методами також надзвичайно трудомістке, вимагає величезних об'ємів обчислювальних операцій, та в силу згаданих причин мало придатне для різноманітних блоків. Експериментальні методи вимагають мінімальних знань про суть технологічних процесів, а з їх допомогою можна відносно швидко отримати математичний опис відповідного процесу з метою його автоматизації.

Математичні моделі складних технологічних об'єктів класифікують за певними ознаками. Так, наприклад, за способом їх отримання вони поділяються на аналітичні та експериментальні [7,8]. Перші з них більше використовують на стадії проектування технологічних процесів, розрахунку та побудови багатоконтурних систем автоматичного регулювання, а також для оцінки змін основних технологічних параметрів відповідних процесів. Аналітичні моделі формують на основі теоретичного аналізу фізико-хімічних процесів та явищ з врахуванням

конструктивних параметрів основних технологічних апаратів та режимних характеристик процесів. Експериментальні методи в більшості використовують для побудови систем автоматичного керування (САК). Емпіричні моделі не містять конкретного фізичного змісту та не відображають фізичну суть конкретного технологічного процесу. Вони можуть бути застосовані для об'єктів, перехідна функція яких може бути лінеаризована у вузькому діапазоні зміни вхідних та вихідних величин (в невеликому діапазоні заданого інтервалу). Такі моделі використовують для побудови систем стабілізації технологічних параметрів.

Виділення невіршеного завдання. Для ідентифікації таких складних та різноманітних об'єктів теплової (вугільної) енергетики, які працюють за схемами парового та газового циклів генерації, а також комбінованих парогазових енергетичних установок запропоновано використовувати функції передачі [7,8] із застосуванням стрибкоподібних, імпульсних чи синусоїдальних збурень на вході відповідних блоків.

Отримання функцій передачі вугільних блоків діючих ТЕС експериментальними методами ускладнено через те що, вони спалюють величезну кількість меленого вугілля (70-100 тонн вугілля за годину), а такий експеримент може тривати дві-три години, тоді експеримент стає надзвичайно вартісним. Газове генерування електричної енергії в Україні з невідомих причин не використовується, хоча існує відповідна інфраструктура з проектування та виготовлення газотурбінних установок.

Залишається тільки один спосіб вирішення поставленого завдання - дослідження функцій передачі (структури математичної моделі) основних блоків генерації електричної енергії як за паровим, так і за газовим способом, що містяться в різноманітних літературних джерелах, які використовуються в інших суміжних сферах наукових досліджень.

Можливі шляхи вирішення поставлено-го завдання. Одним із спрощених підходів до таких розрахунків є підхід до сформульованого вище завдання, що полягає в заміні складного об'єкта із розподіленими параметрами послідовним або паралельним поєднанням ділянок із зосередженими параметрами, які відрізняються єдністю фізичних та технологічних процесів, а також характеризуються простотою математичного опису. Таку складну теплотехнічну систему для прикладу можна розкласти [7] на декілька простих ділянок в такій послідовності:

- перший блок – транспортування пилеподібного вугільного пилу із бункера до палинкових пристроїв до паливної котельного агрегату.

Динамічні властивості цієї ділянки дозволяють наближено вважати його ланкою чистого транспортного запізнення з функцією передачі у вигляді

$$W_1 = e^{-p\tau}, \quad (1)$$

де τ – час запізнення, який визначається швидкістю руху пилеподібної суміші і довжиною подаючого транспортера та довжиною вугільних живильників.

Для сучасних котельних агрегатів залежно від потужності блоків (100 – 800 МВт) величина часу запізнення може змінюватися в діапазоні від декількох секунд до кількох хвилин (5 до 180 с).

- другий блок – паливня, де пилеподібна суміш вугільного пилу з повітрям надходить в паливню, де відбувається спалахування її у факелі, а відтак повне або часткове згоряння.

Процес тепловиділення, коли прихована теплота твердого палива переходить у теплоту газів згоряння, може бути описаний рівнянням інерційної ланки першого порядку із функцією передачі:

$$W_2 = \frac{k_2}{1 + T_2 p}, \quad (2)$$

де k_2 – коефіцієнт підсилення,

T_2 – постійна часу аперіодичної ланки першого порядку.

Постійна часу T_2 змінюється залежно від типу парогенератора, марки палива, кількості повітря, що подається на процес горіння. Тепловий потік, який формується в процесі спалювання сприймається радіаційними та конвективними поверхнями нагрівання парогенератора.

- третій блок, що реалізує процес теплопередачі від димових газів через стінку пароперегрівника до води, що подається в барабан, характеризується функцією передачі W_3

$$W_3 = \frac{k_3}{1 + T_3 p}; \quad (3)$$

- наступний, четвертий блок, який включає у себе барабан, опускні труби циркуляційного контура, а також екранні поверхні парогенератора, де відбувається процес пароутворення. Тут проходить передача тепла через стінки труб воді, що поступає в барабан, нагрів її до кипіння, утворення водяної пари та перенесення її від екранних труб в барабан.

Загальний вигляд складових частин пароводяного тракту котлоагрегату ТЕС потужністю 300 МВт [9] наведено на рис. 2.

Ділянка тракту, на якій відбувається випаровування та часткове перегрівання пари, складається з трьох основних зон: нижня радіаційна частина (НРЧ), верхня радіаційна частина (ВРЧ) та стельовий екран (ПЕ) – після кожної з яких контролюється температура.

Зміна навантаження (витрати живильної води та палива) прямо впливає на динамічні характеристики пароводяного тракту. Врахування цієї особливості об'єкта є необхідною умовою для розробки адекватної моделі та синтезу системи автоматичного керування.

Аналітичне отримання математичних моделей ділянок пароводяного тракту ускладнюється неоднорідністю матеріального потоку всередині труб, наявністю зони максимальної теплоємності (що переміщується повздовж тракту і залежний від навантаження), особливостями використання вугільного палива (що впливають на поведінку факела) та іншими невизначеностями [10], тому на практиці використовуються прикладні емпіричні моделі, що одержуються для конкретного котлоагрегата.

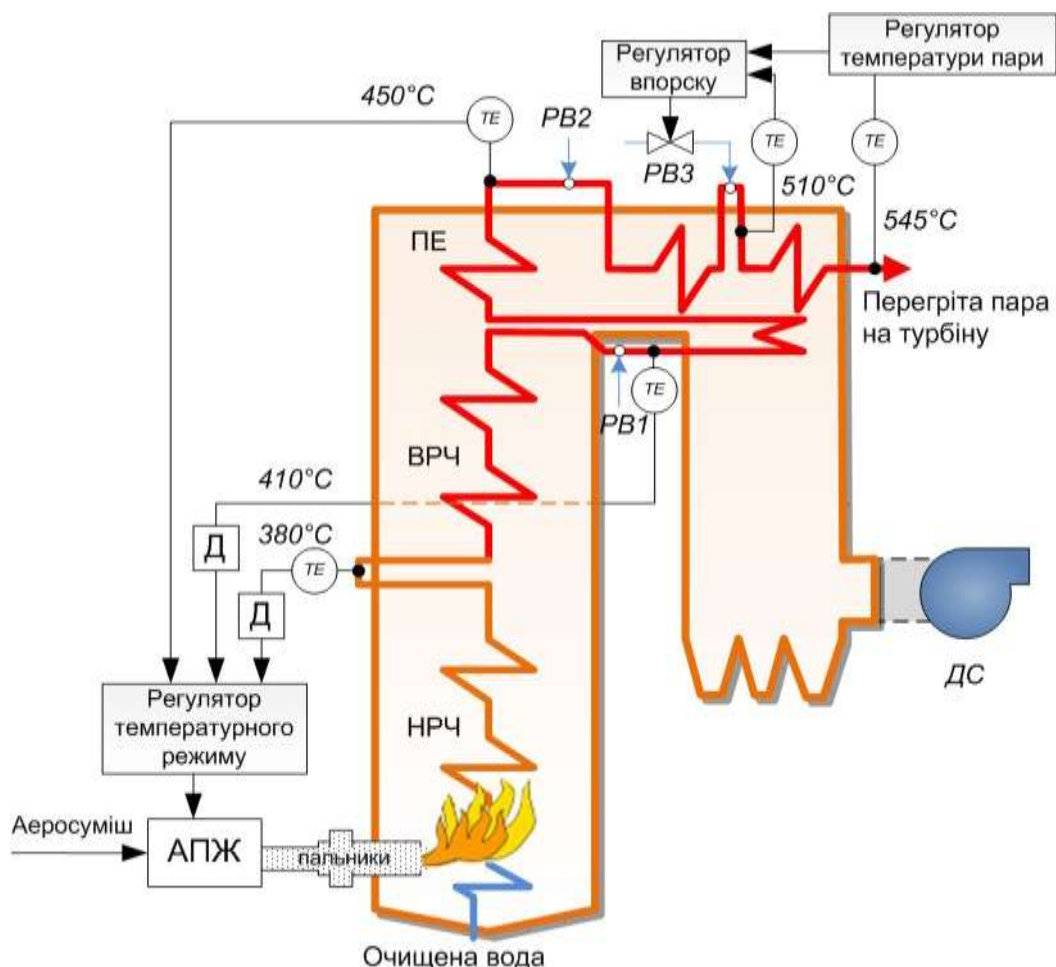
Аналітичне отримання математичних моделей ділянок пароводяного тракту ускладнюється неоднорідністю матеріального потоку всередині труб, наявністю зони максимальної теплоємності (що переміщується по тракту і залежний від навантаження), особливостями використання вугільного палива (що впливають на поведінку факела) та іншими невизначеностями [6], тому на практиці використовуються прикладні емпіричні моделі, для конкретного котлоагрегата.

Експериментальні дані для ідентифікації моделі були отримані згідно методики [7-10] при різних навантаженнях, зокрема: 300 МВт, 275 МВт і 225 МВт. В якості вихідних змінних аналізувалися температури за НРЧ, ВРЧ і за ПЕ як середні значення температури по двом ниткам паропроводу корпусу Б пилувугільного котлоагрегата ТПП-210А енергоблоку №2 Трипільської ТЕС.

Перший графік вихідних змінних представлений на рис. 3а, для проміжку часу з 08:00:00 до 17:00:00 під навантаженням 300 МВт, тобто протягом 9 годин. На графіку помітні стрибки сигналів „Завдання (град.)”, „Керуючий вплив (%)”, а також середніх значень температури НРЧ, ВРЧ і ПЕ (град.), особливо, у проміжки часу приблизно 09:26-11:08 та 14:40-16:25, що відповідають добовим коливанням навантаження ТЕС.

На другому графіку (рис. 3б) показані сигнали при навантаженні 225 МВт зроблені протягом двох годин з 11:30 до 13:30.

Також на обох графіках умовно у вигляді пунктирної лінії зображено режим роботи регулятора, що у базі даних САР ТЕС має кодові значення 1, 2, 4. На графіку рис.2. цей параметр приведений до правої шкали множителем 10, тобто має значення 10, 20 та 40, а на графіку рис.3б має свої безпосередні значення.



АПЖ – аераційний паливний живильник; ВРЧ – верхня радіаційна частина; НРЧ – нижня радіаційна частина; ПЕ – поточний екран

Рисунок 2 – Принципова схема вугільного котлоагрегату ТЕС 300 МВт

За інформацією, наданою персоналом ТЕС, кодування режимів функціонування регуляторів є таким: 1, 2, 3 – автоматичне керування, 4 – режим „дистанція”, тобто керування у ручному режимі операторами. Режими 2 і 3 мають на практиці короткочасне застосування - між двома основними режимами 1 та 4. Значення (код) 1 відповідає безперервній роботі регулятора у режимі стеження за сигналом завдання. У режимі 1 безперервного стеження за завданням, температура ПЕ майже ніколи не дорівнює сигналу завдання, навіть для проміжків часу зі сталими його значеннями. В той же час, у режимі 4 вихідний сигнал температури за ПЕ майже точно збігається із сигналом завдання.

На рис. 4 зображені сигнали для навантаження 225 МВт за менший проміжок часу – 1 годину (11:45-12:45). Температури у різних точках теплового тракту мають таке співвідношення: НРЧ < ВРЧ < ПЕ, що обумовлено фізичними умовами поступового нагрівання і порядку розташування давачів температури у теплового тракту.

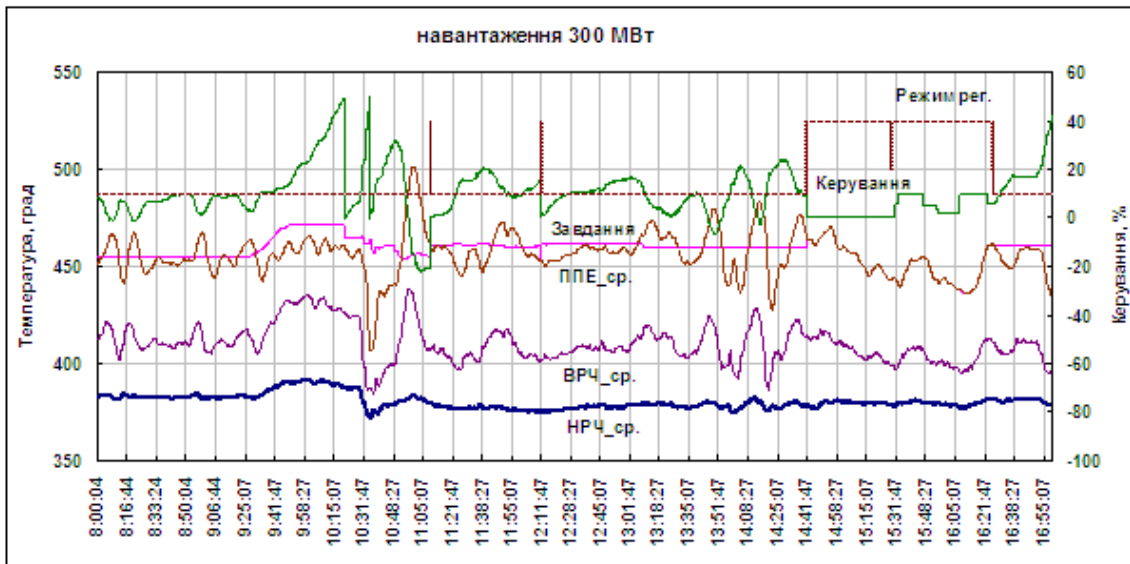
Останні сигнали також мають більш повільний низькочастотний характер у порівнянні з НРЧ, який проявляє більш високочастотні складові можливо за рахунок змін у процесі горіння палива або завод у каналі вимірювання.

Крім того, всі три сигнали мають поступове запізнювання у часі (від НРЧ до ПЕ). Якщо високочастотна складова сигналу НРЧ пов'язана із фізикою процесу теплопередачі у тракту, а не завдама вимірювання і неврахованими збуреннями, то сталі часу каналу НРЧ у моделі об'єкта мають бути меншими за два інших (ВРЧ і ПЕ) і не тільки за рахунок їхнього послідовного додавання.

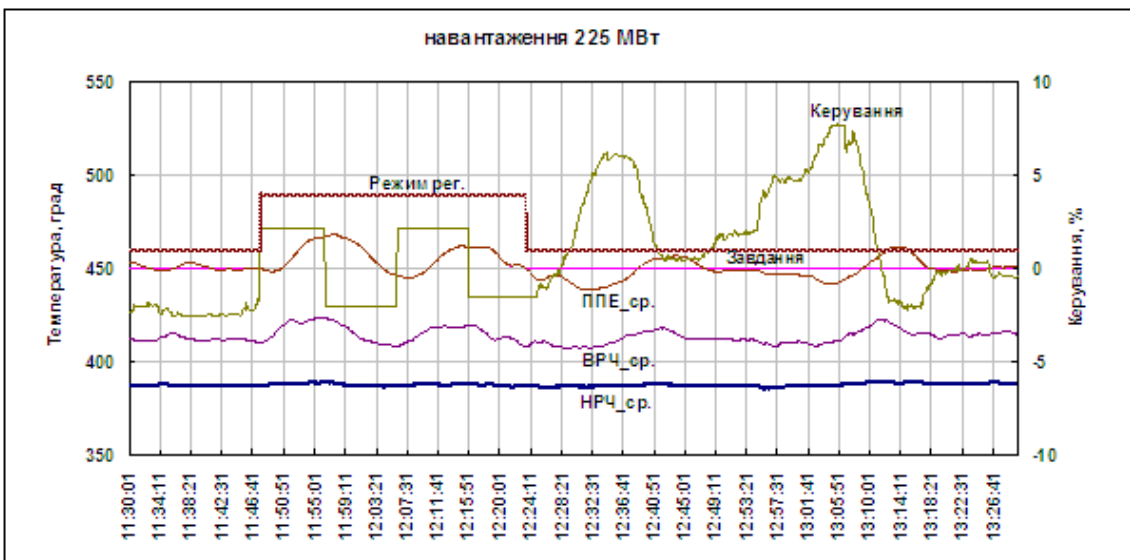
За результатами аналізу експериментальних даних можна сказати, що існуюча САР відпрацьовує збурення гірше, ніж під час керування у ручному режимі операторами ТЕС.

У практиці регулювання об'єктів ТЕС найбільш широкое застосування отримав метод визначення динамічних параметрів регульованого об'єкта за нормальною характеристикою розгону (кривою розгону), під якою розуміється залежність зміни регульованої величини у часі в результаті однократного збурення при відключеному регуляторі (розімкненому контурі). Найбільш розповсюдженою моделлю теплових об'єктів є аперіодична ланка першого порядку із запізнюванням (*First Order Lag Plus Time Delay – FOLPD model*):

$$F_A(s) = \frac{K_s}{1 + T_1 s} e^{-sT_1} \quad (4)$$



а)



б)

Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів каналами НРЧ, ВРЧ і ПЕ при навантаженнях 300 МВт (а) і 225 МВт (б)

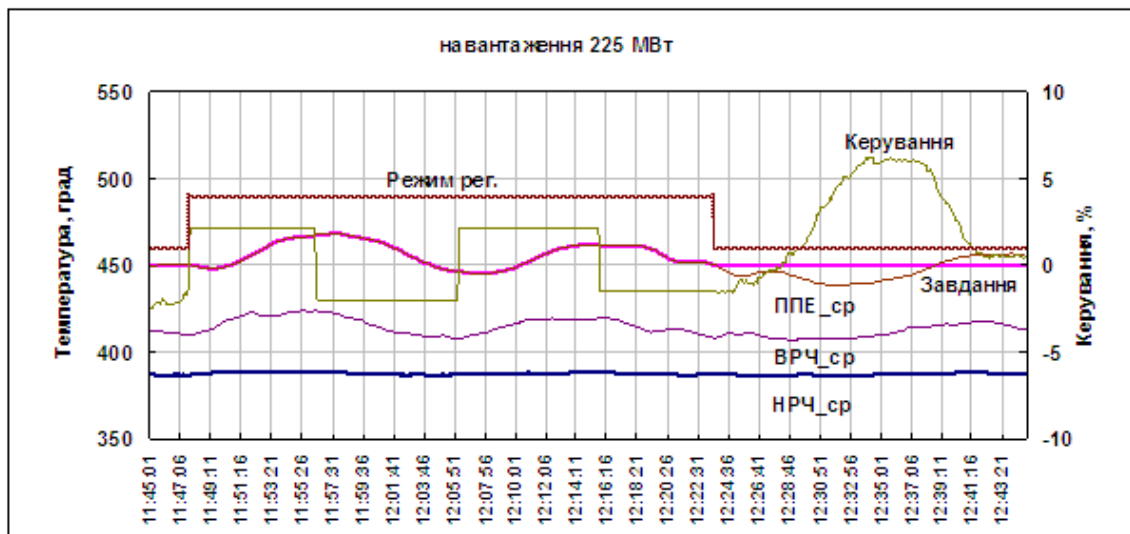
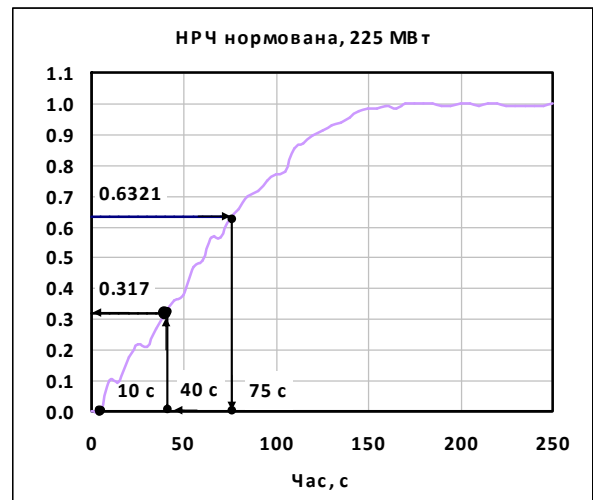
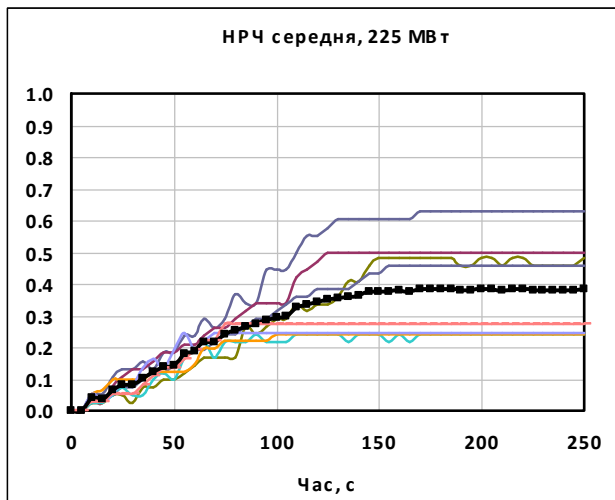


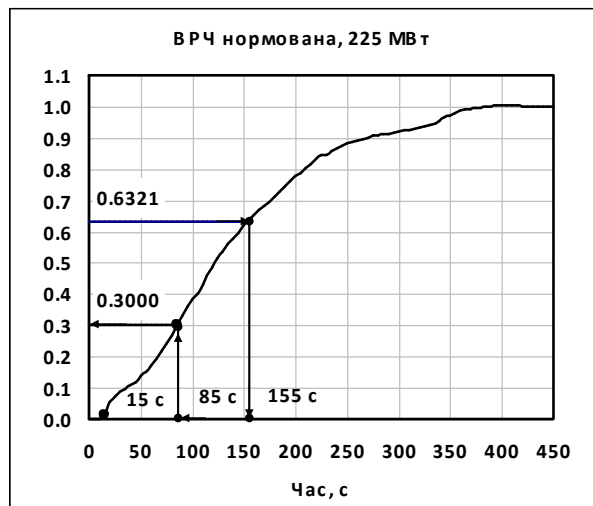
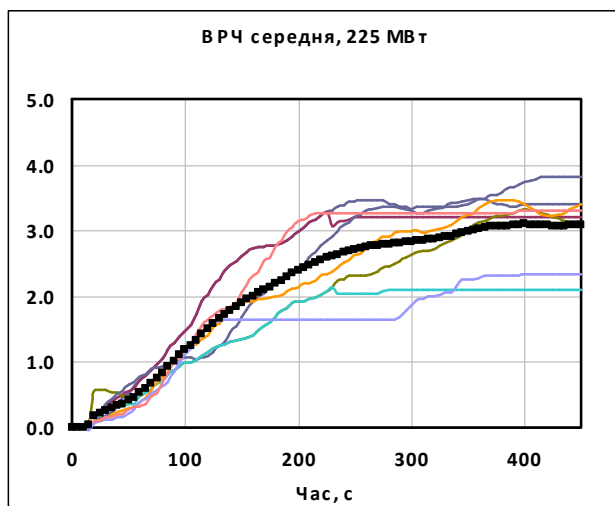
Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів каналами НРЧ, ВРЧ і ПЕ при навантаженні 225 МВт за проміжок часу - 1 година (11:45-12:45)



а)

б)

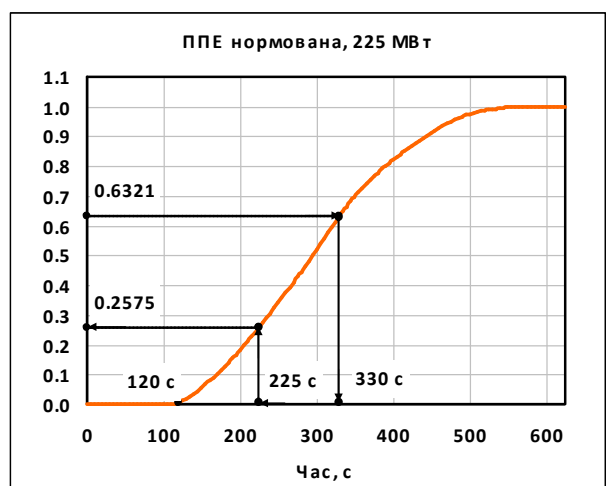
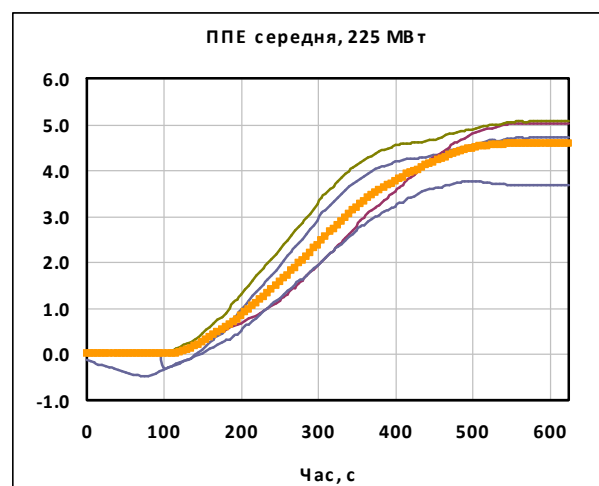
Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів каналом НРЧ



а)

б)

Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів каналом ВРЧ



а)

б)

Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів каналом ПЕ

Описаний вище алгоритм методу додаткових членів був реалізований у розробленій комп'ютерній програмі [13], що дозволяє в автоматизованому режимі оперувати файлами вхідних даних отриманих на об'єкті і отримувати параметри моделі швидкодіючих та інерційних ділянок об'єкту. Враховуючи стохастичний характер процесів, застосовані багаторазові тести ступінчастого впливу та низькочастотну фільтрацію сигналів, тому параметри об'єкта можуть бути визначені навіть при великих завадах у вимірах.

Чисте запізнювання по каналу НРЧ (див. рис. 5б) складає $\tau=10$ с, $t_1=75-10=65$ с, $t_2=65/2=32.5$ с або на графіку 42.5 с із врахуванням τ , тоді $h(t_2)=0.317-0.358$. Значення $h(t_2)$ взято з інтервалом, тому що дискретизація у часі складає 5 с і точка 42.5 с розташовується між двома відліками. Найближче до інтервалу 0.317-0.358 значення на графіку рис. 5а є 0.297, тобто порядок даної системи $n=2$. $D_n = 0.642$.

Стрілками на рис. 5б і далі показані кроки виконання алгоритму пошуку параметрів динамічної системи. Перша стала часу каналу НРЧ: $T_1 = D_n t_1 = 0.642 \times 65 = 42$ с; друга стала часу: $T_2 = T_1/2 = 21$ с. Коефіцієнт підсилення знаходимо за рис. 5а. Він складає $K = 0.38$.

Чисте запізнювання каналом ВРЧ складає $\tau=15$ с (див. рис. 6б), $t_1=155-15=140$ с, $t_2=140/2=70$ с, або на графіку 85 с із врахуванням τ , тоді $h(t_2)=0.3000$. Найближче до 0.3000 значення на графіку рис. 3 є 0.297, тобто порядок даної системи $n=2$. За n знаходимо коефіцієнт $D_n = 0.642$. Перша стала часу каналу ВРЧ: $T_1 = D_n t_1 = 0.642 \times 140 = 90$ с; друга стала часу: $T_2 = T_1/2 = 45$ с, коефіцієнт підсилення складає $K=3.08$.

Чисте запізнювання каналом ПЕ складає $\tau = 120$ с (див. рис. 7б), $t_1=330-120=210$ с, $t_2=210/2=105$ с або на графіку 225 с із врахуванням τ , тоді $h(t_2)=0.2575$. Найближче до 0.2575 значення на графіку рис. 6а є 0.240, тобто порядок даної системи $n=3$. За n знаходимо коефіцієнт $D_n = 0.524$. Перша стала часу каналу ПЕ: $T_1 = D_n t_1 = 0.524 \times 210 = 110$ с; друга стала часу: $T_2 = T_1/2 = 55$ с, третя стала часу: $T_3 = T_1/3 = 27.5$ с. Коефіцієнт підсилення складає $K=4.6$.

На деяких графіках перехідних процесів ПЕ (див. рис. 7а) видно, що вихідна величина у початковий момент часу починає спадати, а потім зростати, що за даними роботи [10] характерно для парових котлів високого тиску і пов'язано з ефектом "скипання" поверхні.

Слід зауважити, що закономірно спостерігається поступове збільшення всіх сталих часу у напрямку НРЧ→ВРЧ→ПЕ, обумовлене конструктивним розташуванням давачів температури у котлоагрегаті. Також слід відзначити збільшення коефіцієнтів підсилення від НРЧ до ПЕ, яке викликано необхідністю регулювання менш чутливих до керуючого впливу більш віддалених від паливної точки вимірювання температури. Зменшення вдвічі коефіцієнтів підсилення каналами НРЧ, ВРЧ, ПЕ порівняно із

експериментальними даними обумовлено різницею параметрів виконавчого механізму у ручному режимі, в якому визначалися криві розгону, і в автоматичному режимі регулювання під час роботи САР.

За результатами ідентифікації можна зробити висновок, що найбільший вплив зміна навантаження має на коефіцієнт передачі $K_{об}$ та транспортне запізнювання, і меншою мірою на сталі часу об'єкта керування.

За результатами ідентифікації параметрів каналів об'єкта керування, наведених у таблицях 1-3, отримано математичні моделі у вигляді функцій передачі.

Таблиця 1 – Параметри ідентифікованої моделі каналу НРЧ

N, МВт	K, С/%	T1, с	T2, с	τ , с
225	0,35	42	21	15
275	0.26	38	19	12
300	0,19	36	18	10

Таблиця 2 – Параметри ідентифікованої моделі каналу ВРЧ

N, МВт	K, С/%	T1, с	T2, с	τ , с
225	3,10	90	45	25
275	1,90	84	42	20
300	1,60	80	40	17

Таблиця 3 – Параметри ідентифікованої моделі каналу ПЕ

N, МВт	K, С/%	T1, с	T2, с	T3, с	τ , с
225	4,60	110	55	27	120
275	3,10	106	53	26	107
300	2,50	102	51	25	100

Коефіцієнти вказуються для навантаження 275 МВт, оскільки воно є середнім, і системи керування налаштовуються на нього.

Передавальна функція каналу ПЕ із числовими значеннями параметрів має такий вигляд: третього порядку

$$W_{PE}(p) = \frac{3,1}{106 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{53 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{26 \cdot p + 1} \cdot e^{-107 \cdot p};$$

другого порядку

$$W_{PE}(p) = \frac{0,5}{110 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{27,5 \cdot p + 1} \cdot e^{-120 \cdot p}.$$

Передавальна функція каналу ВРЧ: третього порядку

$$W_{BRQ}(p) = \frac{0,5}{90 \cdot p + 1} \cdot \frac{3,08}{45 \cdot p + 1} \cdot \frac{165p}{165 \cdot p + 1} \cdot e^{-15 \cdot p};$$

другого порядку

$$W_{BRQ}(p) = \frac{1,9}{84 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{42 \cdot p + 1} \cdot e^{-20 \cdot p}.$$

Передавальна функція каналу НРЧ: третього порядку

$$W_{HRQ}(p) = \frac{0,5}{42 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,38}{21 \cdot p + 1} \cdot \frac{3 \cdot 80p}{80p + 1} \cdot e^{-10 \cdot p};$$

другого порядку

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0,26}{38 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{19 \cdot p + 1} \cdot e^{-12 \cdot p}.$$

Також для подальших експрес-налаштувань диференціаторів каналів НРЧ та ВРЧ отримано передатні функції першого порядку із запізненням:

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0,26}{50 \cdot p + 1} \cdot e^{-30 \cdot p};$$

$$W_{ВРЧ}(p) = \frac{1,9}{105 \cdot p + 1} \cdot e^{-55 \cdot p}.$$

Для подальшого використання отриманих математичних моделей контурів було проведено їх перевірку на адекватність шляхом порівняння відносного інтегрального відхилення кривих розгону.

Відносне інтегральне відхилення скало не більше 3%, що є допустимим за загальними нормами проектування САР, тобто моделі 2-го та 3-го порядків із транспортним запізненням можна вважати адекватними.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасного стану теплової енергетики України, з результатів якого випливає, що основне технологічне обладнання більшості з них вичерпало свій технічний ресурс, а також існує брак маневрових потужностей. Для покриття пікових навантажень використовуються вугільні блоки, що прискорює їх зношення.

2. Пропонується при переоснащенні ТЕС надавати перевагу комбінованим парогазовим енергетичним установкам, в яких реалізується, крім парового, газовий спосіб генерації електричної енергії. При цьому газова частина може працювати на продуктах внутріциклової газифікації вугілля низької якості.

3. Для оптимального підбору потужностей парової і газової частин необхідно вивчити динамічні характеристики основних блоків ТЕС.

4. Виконана статистична обробка експериментальних даних, отриманих на енергоблоці Трипільської ТЕС, при різних рівнях навантаження котлоагрегата. У результаті розроблені моделі ділянку регулювання первинного тракту котлоагрегату потужністю 300 МВт, а саме: НРЧ, ВРЧ, ПЕ каналом «керуючий вплив (%) – температури (град.)» у вигляді функцій передачі. Визначені постійні часу і коефіцієнти передачі за вказаними каналами.

5. Отримано функції передачі 1-го та 2-го порядків еквівалентного об'єкта керування із урахуванням швидкодіючих каналів з диференціаторами для можливості застосування класичних методик налаштування та проведення досліджень САР у частотній області.

Література

1 Воронцов С. Про відповідність Енергетичної ст1. Воронцов С. Про відповідність енергетичної стратегії України на період до 2030 року сучасним викликам і загрозам у сфері енергетичної безпеки // Національний інститут стратегічних досліджень. – Електронний ресурс: <http://www.niss.gov.ua/articles/470/>

2 Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины / [Мацевитый Ю. М., Стогний Б. С., Шидловский А. К.] // Энергетика та електрифікація. – 2013. – № 1. – С. 48–52.

3 Праховник А. В. Развитие маневренной генерации ОЭС Украины как фактор повышения энергетической безопасности государства / [Праховник А. В., Попов В. А., Находов В. Ф., Баталов А. Г., Денисевич К. Б.] // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 7. – С. 9–12.

4 Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення / Запорожець Ю.М. // Наукові праці. Серія "Техногенна безпека". – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили, 2005. – С.31-39.

5 Патон Б.Є. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології / [Б.Є.Патон, А.А.Долинський, А.А. Халатов та ін.] // Вісник НАН України. – 2009. – № 4. – С.61-69.

6 Плетнев Г.П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций / Г.П. Плетнев. – М.: Энергия, 1976. – 423 с.

7 Бунке О.С. Автоматизация процессов управления инерционными контурами котлоагрегата тепловой электростанции с использованием метода динамической коррекции: диссертация на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук – Київ, НТТУ "КПІ", 2014. – 145с.

8 Серов Е.П. Динамика парогенераторов / Е.П. Серов, Б.П.Корольков. – М.: Энергоиздат, 1981. – 408 с.

9 Балакирев В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С.Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М.Цирлин. – М.: Энергия, 1967. – 229 с.

10 Бунке О.С. Програмный комплекс для идентификации объектов управления на базе табличных данных [Текст] / О.С. Бунке, А.В. Полюхович // Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів: тези доповідей (18-22 квітня, 2011). – К.: КПІ, 2011. – С. 174.

Стаття надійшла до редакційної колегії
10.05.18

Рекомендована до друку
професором Семенцовим Г.Н.
(ФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Воцинським В.С.
(ТЗОВ СКБ ЗА, м. Івано-Франківськ)