

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ОСНОВНИХ БЛОКІВ ТЕПЛОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

М.П. Кулик, М.В. Шавранський

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;

e-mail: m\_p\_kulik@ukr.net, shavranskyu\_m28@rambler.ru

*Проаналізовано стан теплової енергетики України, що використовує переважно паровий спосіб генерації електричної енергії. Більшість вугільних блоків працюючих ТЕС вичерпали свій технологічний ресурс, проте при нестачі маневрових потужностей використовуються у непроєктних напівопікових та пікових режимах. Запропоновано при переоснащенні ТЕС перевагу надавати комбінованим парогазовим енергетичним установкам, які характеризуються кращими маневровістю та мобільністю. Досліджено функції передачі основних блоків парової генерації електричної енергії, що дасть змогу при комбінуванні із газовою генерацією розширити діапазон зміни потужності та швидкість її набору.*

Ключові слова: функція передачі, парогазова енергетична установка, маневрові характеристики, перехідна характеристика.

*Проанализировано состояние тепловой энергетики Украины, в которой используется паровой способ генерации электрической энергии. Большинство угольных блоков работающих ТЭС исчерпали свой технологический ресурс, однако при нехватке маневренных мощностей, используются в непроектных полупиковых и пиковых режимах. При переоснащении ТЭС предлагается давать предпочтение комбинированным парогазовым энергетическим установкам, которые характеризуются лучшими маневренными и мобильными показателями. Исследованы функции передачи основных блоков паровой генерации электрической энергии, что позволит при их сочетании с газовой генерацией, увеличить диапазон изменения мощности, а также увеличить скорость ее изменения.*

Ключевые слова: функция передачи, парогазовая энергетическая установка, маневренные показатели, переходная характеристика.

*The state of thermal power of Ukraine which mainly uses a steam method for generating electricity has been analyzed. Most coal units of operating TPPs have exhausted their technological resources but are used in non-project semi-peak and peak modes during lack of maneuver capacity. It is suggested to give preference to combined steam and gas power plants characterized by better maneuverability and mobility during revamp of TPPs. The transfer functions of the main steam power generation units are studied, which will make possible in combination with gas generation to extend the power change range and power increase rate of combined steam and gas power plant.*

Keywords: transfer function, steam and gas power plant, maneuver characteristics, transient characteristics.

**Вступ.** Теплові електричні станції (ТЕС) є складовою частиною об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, на які припадає значна частина встановленої потужності та відповідна кількість виробленої електроенергії. В структурі генеруючих потужностей компонентів ОЕС виявлено диспропорцію між об'єктами, що можуть працювати в базовому, напівопіковому та піковому режимах [1, 2]. На даний момент часу енергоблоки ТЕС використовуються у непроєктних 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].

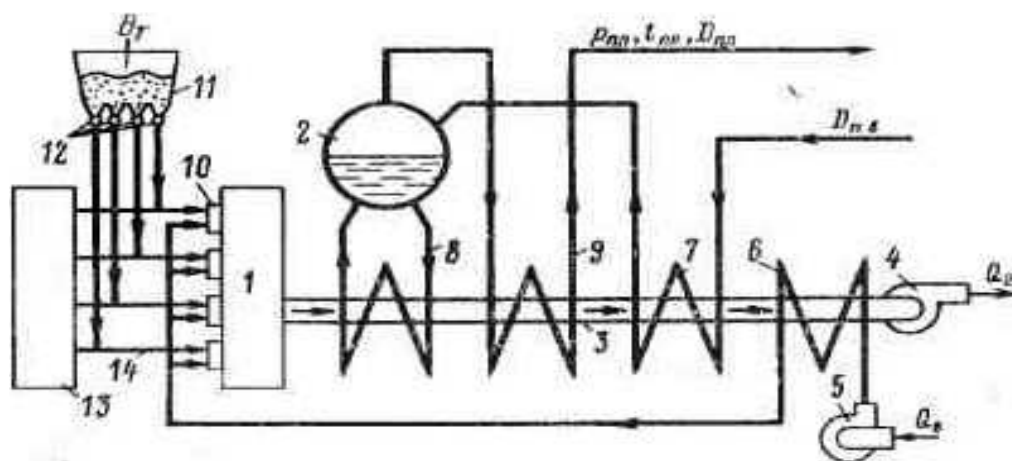
**Аналіз існуючого стану.** Розвідані запаси вичерпаності сировини для основних технологічних процесів об'єктів теплової енергетики, які використовують переважно для отримання електричної та теплової енергії – кам'яне вугілля та природний газ – є скінченими. Так, за теперішніх об'ємів споживання вугілля термін їх виче-

рпання становить 450 років, а для природного газу – на порядок менший.

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

Одним із найбільших, і в той же час 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 вугільного пилу, паливної 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 їх 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



1 – топка, 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 котельного агрегату з пиловугільним блоком**

моделі із зосередженими та розподіленими теплофізичними параметрами.

Принципова схема котельного агрегату із пиловугільним блоком наведена на рис. 1.

Аналітичне визначення статичних і динамічних характеристик таких систем шляхом складання диференційних 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 зазвичай 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 своїй 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 (у невеликому діапазоні заданого інтервалу). Такі

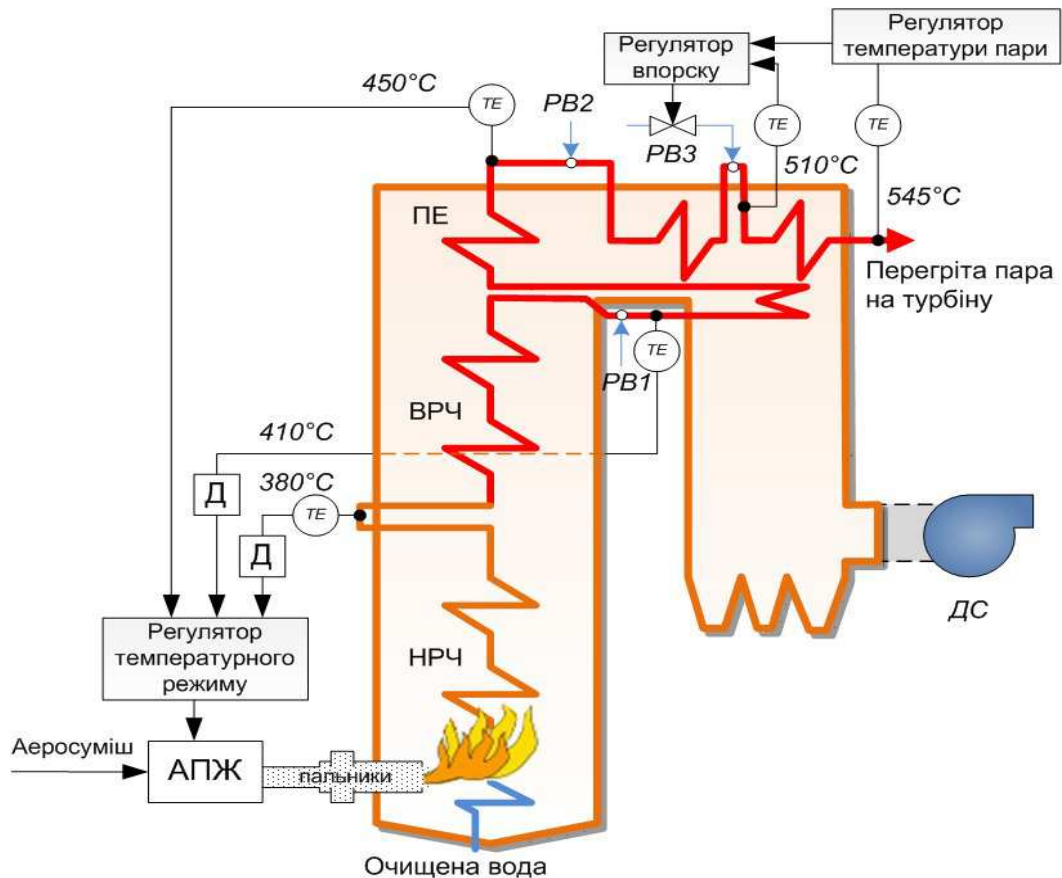
моделі використовують для побудови систем стабілізації технологічних параметрів.

**Виділення невирішеного 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 утруднено у зв'язку з тим, що вони спалюють величезну кількість меленого вугілля (70-100 тонн вугілля за годину). Триваючи дві-три години, такий експеримент стає надзвичайно вартісним. Газова генерація 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 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 поставленого завдання.** Один із спрощених підходів до таких розрахунків 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 у такій послідовності.



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

Рисунок 2 - Принципова схема вугільного котлоагрегата ТЕС 300 МВт

Перший блок – транспортування пилеподібного вугільного пилу із бункера до паливних пристроїв відтак до топки котельного агрегату.

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

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

де  $\tau$  - час запізнення, який визначається швидкістю руху пилеподібної суміші, 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 – топкова камера (паливня). Пилеподібна суміш вугільного пилу з повітрям надходить в паливню, де відбувається спалювання її у факелі, а в подальшому повне або часткове згоряння.

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

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

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 живильної води, характеризується функцією передачі  $W_3$ :

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

Четвертий блок включає у себе барабан, опускні труби циркуляційного контура, а також екранні поверхні парогенератора, де проходить процес пароутворення. Тут відбувається передача тепла через стінки труб живильній воді, нагрівання її до кипіння, утворення водяної пари та перенесення її від екранних труб у барабан.

Загальний вигляд складових частин пароводяного тракту котлоагрегата 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 них контролюють температуру пари.

Зміна навантаження (витрати живильної води та палива) безпосередньо 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 теплосності (що переміщується по тракту залежно 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.

Експериментальні дані для ідентифікації моделі були отримані згідно з методикою [11,12] при різних навантаженнях, зокрема: 300 МВт, 275 МВт і 225 МВт. Як вихідні змінні аналізувалися температури за НРЧ, ВРЧ і за ПЕ як середні значення температури по двох нитках паропроводу корпусу Б пиловугільного котлоагрегата ТПП-210А енергоблоку № 2 Трипільської ТЕС.

Перший графік вихідних змінних, представлений на рис.3а, зроблений у проміжок 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) відображені 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. 3а) цей параметр приведений до правої шкали множителем 10, тобто має значення 10, 20 та 40, а на графіку рис.3б має свої безпосередні значення.

За інформацією, наданою персоналом ТЕС, кодування режимів функціонування регуляторів є наступним: 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. Водночас

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 завад 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 завадами 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.

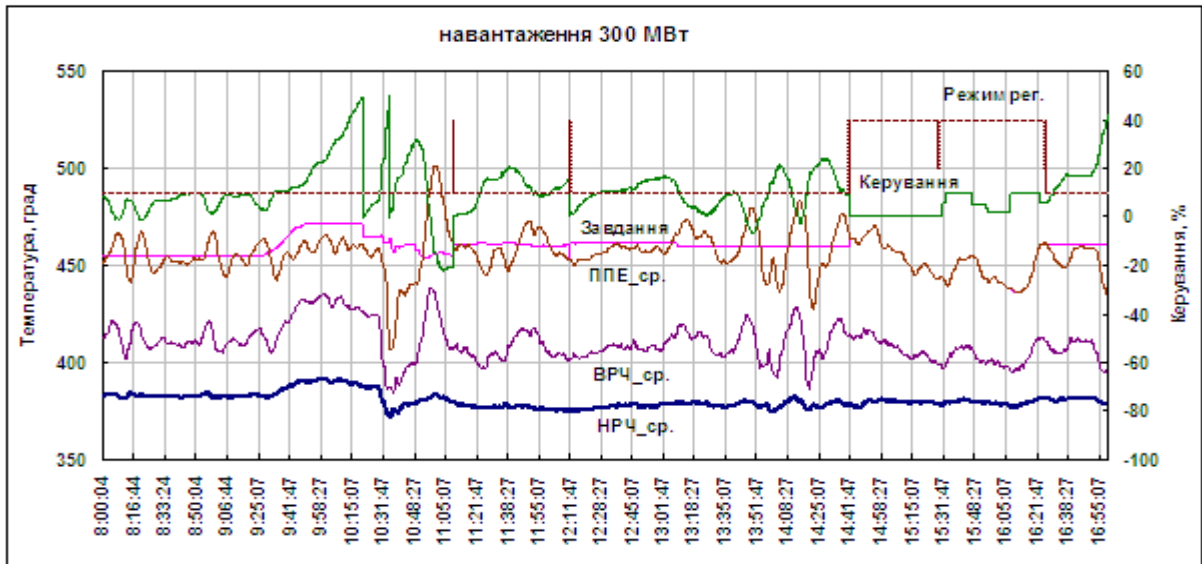
За результатами аналізу експериментальних даних можна сказати, що існуюча САР відпрацьовує збурення гірше, ніж під час керування у ручному режимі операторами ТЕС.

У практиці регулювання об'єктів ТЕС найбільш широке 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*):

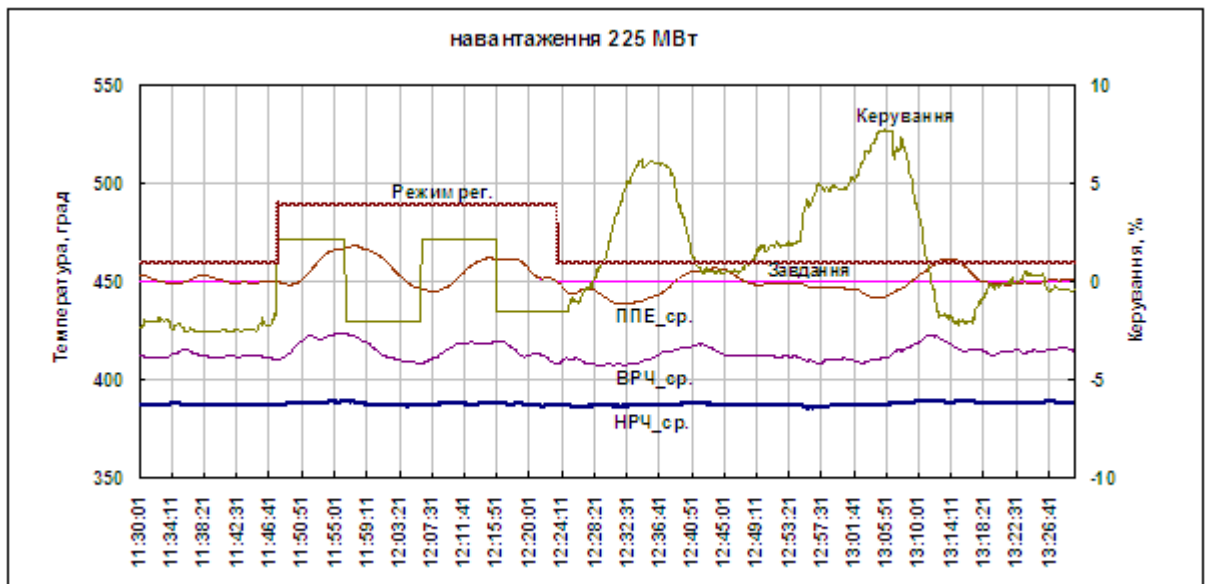
$$F_A(s) = \frac{K_s}{1 + T_1 s} e^{-sT_d} \quad (4)$$

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'єкта. Враховуючи стохастичний характер процесів, застосовані багаторазові тести ступінчастого впливу та низькочастотну фільтрацію сигналів, тому параметри об'єкта можуть бути визначена 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  $\tau$ , 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 знаходиться між двома відліками. Найближче до інтервалу 0.317 – 0.358 значення на графіку рис. 5а є рівним 0.297, тобто порядок даної системи  $n=2$ .  $D_n = 0.642$ .



а)



б)

Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів по каналах НРЧ, ВРЧ і ПЕ за навантажень 300 МВт (а) і 225 МВт (б)

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 по каналу 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  $\tau$ , 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 по каналу 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  $\tau$ , 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 "закипання" поверхні.

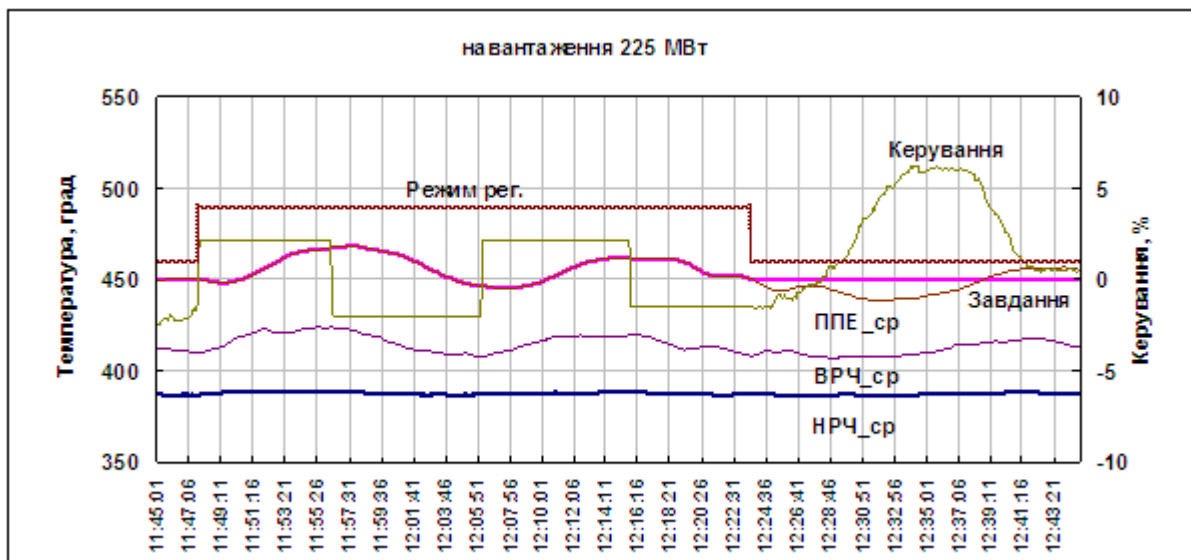
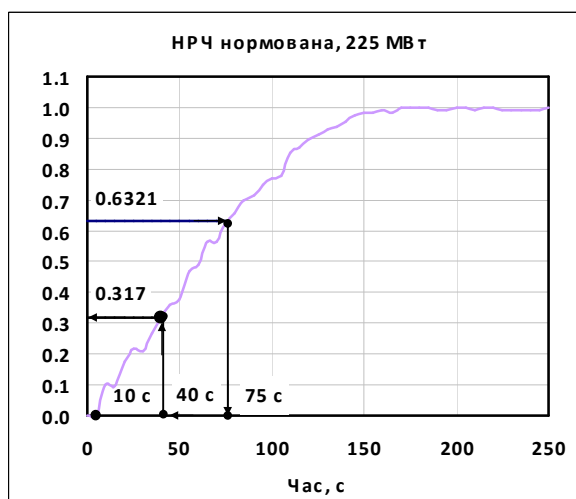
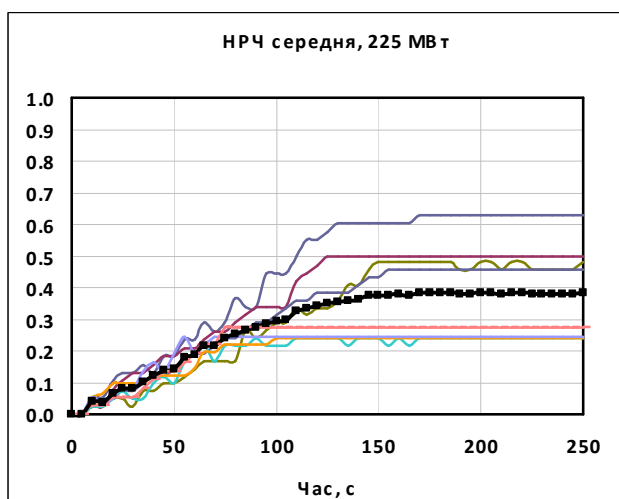
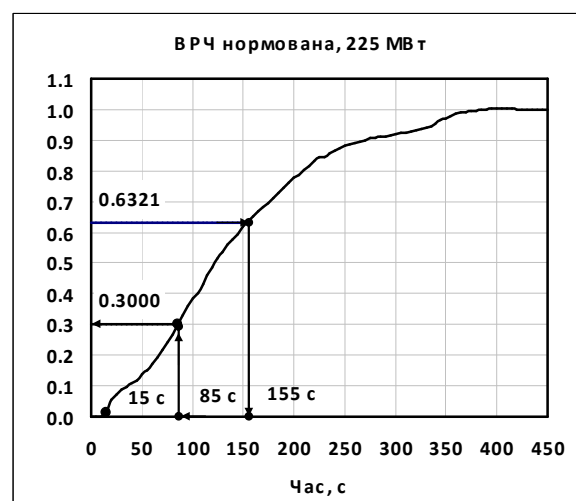
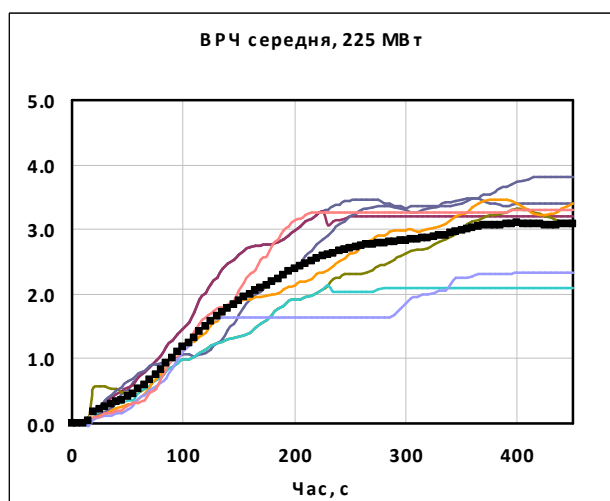


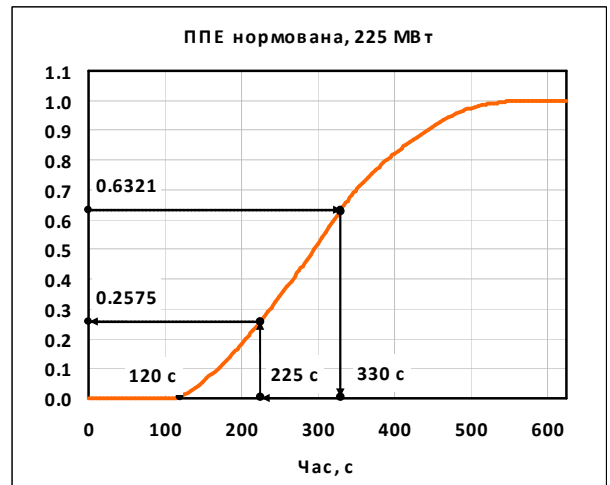
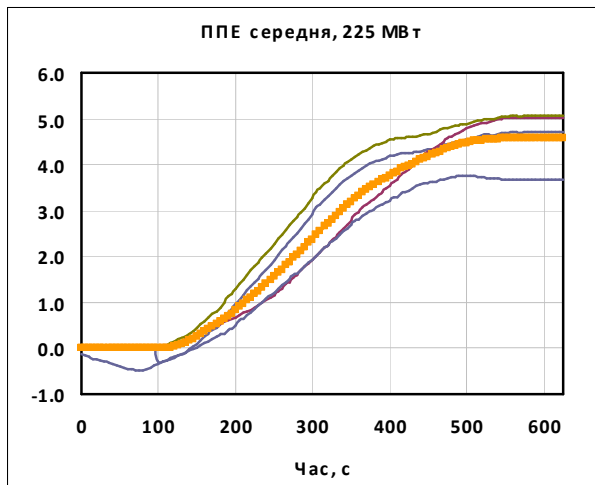
Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів по каналах НРЧ, ВРЧ і ПЕ при навантаженні 225 МВт за проміжок часу 1 година (11:45-12:45)



а) б)  
Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів по каналу НРЧ



а) б)  
Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів по каналу ВРЧ



а) б)  
Рисунок 7 – Графіки переходних процесів по каналу ПЕ

Можна відзначити, 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 і більш віддалених від топки точок виміру температури. Зменшення вдвічі порівняно із експериментальними даними коефіцієнтів підсилення по каналах НРЧ, ВРЧ, ПЕ обумовлено різницею параметрів виконавчого механізму у ручному режимі, на якому визначалися розгінні криві, і в автоматичному режимі регулювання під час роботи САР.

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	T2, с	τ, с
225	4,60	110	55	27	120
275	3,10	106	53	26	107
300	2,50	102	51	25	100

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

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

Функція передачі каналу ПЕ із числовими значеннями параметрів має такий вигляд:

$$W_{ПЕ}(p) = \frac{3,1}{106 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{53 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{26 \cdot p + 1} \cdot e^{-107 \cdot p}; \quad (5)$$

другого порядку

$$W_{ПЕ}(p) = \frac{0,5}{110 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{27,5 \cdot p + 1} \cdot e^{-120 \cdot p} \quad (6)$$

Функція передачі ВРЧ:

третього порядку

$$W_{ВРЧ}(p) = \frac{0,5}{90 \cdot p + 1} \cdot \frac{3,08}{45 \cdot p + 1} \cdot \frac{165p}{165 \cdot p + 1} \cdot e^{-15 \cdot p}; \quad (7)$$

другого порядку

$$W_{ВРЧ}(p) = \frac{1,9}{84 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{42 \cdot p + 1} \cdot e^{-20 \cdot p} \quad (8)$$

Функція передачі каналу НРЧ:

третього порядку

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0,5}{42 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,38}{21 \cdot p + 1} \cdot \frac{3 \cdot 80p}{80p + 1} \cdot e^{-10 \cdot p}; \quad (9)$$

другого порядку

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0,26}{38 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{19 \cdot p + 1} \cdot e^{-12 \cdot p} \quad (10)$$

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

$$W_{НРЧ}(p) = \frac{0,26}{50 \cdot p + 1} \cdot e^{-30 \cdot p}; \quad (11)$$

$$W_{ВРЧ}(p) = \frac{1,9}{105 \cdot p + 1} \cdot e^{-55 \cdot p} \quad (12)$$

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

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

### Висновки

1. Проаналізовано сучасний стан теплової енергетики України, з результатів якого витікає, що основне технологічне обладнання більшості з них вичерпало свій технологічний ресурс, а також існує брак маневрових потужностей. Для покриття пікових навантажень використовуються вугільні блоки, що прискорює їх зношування.

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 розроблено моделі ділянок регулювання первинного тракту котлоагрегату потужністю 300 МВт, а саме: НРЧ, ВРЧ, ПЕ по каналу «керуючий вплив (%) - температури (град.)» у вигляді функцій передачі. Визначено 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 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 Мацевитый Ю. М. Научно-техническое обеспечение долгосрочных планов развития энергетики Украины / Ю.М.Мацевитый, Б.С. Стогний, А.К. Шидловский // Энергетика та електрифікація. – 2013. – № 1. – С. 48–52.

3 Праховник А. В. Развитие маневренной генерации ОЭС Украины как фактор повышения энергетической безопасности государства / А.В.Праховник, В.А. Попов, В.Ф. Находов,

А.Г. Баталов, К.Б.Денисевич // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 7. – С. 9–12.

4 Запорожець Ю.М. Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття або інтенсивне відновлення / Ю.М.Запорожець // Наукові праці. – Серія “Техногенна безпека”. – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили.

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

6 Кулик М.П. Перспективи інтенсивного відновлення теплової енергетики України на базі комбінованих парогазових енергетичних установок / М.П.Кулик, Й.С.Мисак // Прикарпатський Вісник НТШ. – 2017. – Число 1(37). – С. 277–295.

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

8 Кулик М.П. Аналіз основних підходів до ідентифікації об'єктів великої енергетики / М.П.Кулик, В.Р.Процюк // Прикарпатський Вісник НТШ. – 2015. – Число 1(29). – С.275–287.

9 Бунке О.С. Автоматизація процесів керування інерційними контурами котлоагрегата теплової електростанції з використанням методу динамічної корекції: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. – Київ: НТТУ “КПІ”, 2014. – 145 с.

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

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

12 РД 34.30.310 (МУ 34-70-062-83). Методические указания по проверке и испытанию автоматических систем регулирования и защиты паровых турбин / М.С. Глазер. – М.: Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации, 1994. – 71 с.

13 Бунке О.С. Программный 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 (Київ, 18-22 квітня, 2011): тези доповідей. – К.: КПІ, 2011. – 174 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
01.12.17

Рекомендована до друку  
професором **Горбійчуком М.І.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Кривенем В.А.**

(Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль)