

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

КРУГОЛ МИКОЛА МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.311

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ
ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Лазуренко Олександр Павлович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
Завідувач кафедри електричних станцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, ст. наук. співробітник
Тугай Юрій Іванович,
Інститут електродинаміки НАН України, завідувач
відділу оптимізації систем електропостачання №14;

кандидат технічних наук, доцент
Савченко Олександр Анатолійович
Харківський Національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка, доцент
кафедри електропостачання та енергетичного
менеджменту.

Захист відбудеться «15» квітня 2021 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Автореферат розісланий «12» березня 2021 року.

Секретар спеціалізованої вченої ради



Дмитро ДАНИЛЬЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна частка електричної енергії в Україні генерується на теплових електричних станціях (ТЕС), технологічне обладнання яких суттєво застаріло і потребує докорінної реконструкції.

Основними споживачами електричної енергії в системах власних потреб ТЕС є електричні двигуни. На ТЕС використовуються в основному асинхронні двигуни (АД) з коротко замкнутим ротором напругою 0,4 та 6 кВ, що приводять в дію механізми власних потреб (ВП). Механізми ВП відрізняються за призначенням, виконанням, та характеристиками, проте основними типами механізмів ВП, що застосовуються в технологічному процесі вироблення теплової та електричної енергії на ТЕС є відцентрові механізми (ВМ) – насоси та вентилятори. Дослідження показують, що витрати електричної енергії на привод ВМ складає більш ніж 90% від загальних витрат в системах власних потреб ТЕС, що працюють на газі чи мазуті.

Робота основного устаткування ТЕС у неномінальних режимах в наслідок участі станції в добовому графіку регулювання навантаження, або при роботі ТЕЦ за тепловим графіком навантаження призводить до необхідності регулювання основних параметрів роботи ВМ – їх продуктивності та напору. В свою чергу продуктивність з якою працює ВМ, напір, який ВМ розвиває, його ККД визначають навантаження на валу АД, та електричну потужність яку АД споживає з електричної мережі. Аналіз характеристик АД та ВМ показує, що дані механізми працюють з максимальним ККД при навантаженнях близьких до номінальних. При регулюванні параметрів ВМ значно знижується ефективність їх роботи, в наслідок чого частка споживання електричної енергії на власні потреби значно зростає.

Виходом з даної ситуації є пошук енергоефективних способів регулювання ВМ. Найбільш ефективним способом регулювання ВМ є зміна швидкості обертання робочого колеса механізму, що може бути виконане за рахунок регулювання частоти живильної напруги АД при використанні перетворювачів частоти (ПЧ). Даний спосіб регулювання дає значний ефект за рахунок зниження споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС.

Проте, особливістю систем власних потреб ТЕС є використання потужних високовольтних АД, а високовольтні ПЧ мають високу ціну, що призводить до зростання необхідних капіталовкладень на модернізацію систем власних потреб ТЕС. З іншого боку аналіз режимів роботи механізмів ВП ТЕС показав, що можна виділити групи механізмів з близькими режимами роботи та схожими характеристиками, що дає змогу використання одного високовольтного ПЧ для живлення групи механізмів ВП (групового споживача ВП ТЕС), тобто впровадити групове керування механізмами ВП. Впровадження такого способу регулювання може значно зменшити капіталовкладення на модернізацію систем власних потреб ТЕС і значно підвищити їх енергоефективність.

Таким чином, задача підвищення енергоефективності в системах власних потреб за рахунок впровадження енергоефективних способів регулювання

параметрів механізмів ВП, що приводяться в дію АД є актуальною, та визначає напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до планів наукових досліджень кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» та у відповідності до НДР МОН України «Розвиток теорії та науково-методичних основ для створення і модернізації турбогенераторів, що задовольняють сучасним вимогам електроенергетичної системи України» (ДР № 0115U000528). НДР виконувалась спільно з кафедрою електричних машин.

Мета і задачі дослідження. Підвищення енергоефективності та зменшення витрат електричної енергії в системах власних потреб ТЕС за рахунок застосування групового регулювання частоти живильної напруги АД, що приводять в дію механізми ВП.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити структуру споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС в залежності від режиму їх роботи;
- виконати аналіз основних способів регулювання параметрів механізмів ВП ТЕС, що приводяться в дію електричними двигунами;
- розвинути математичні моделі основних механізмів ВП ТЕС, як навантажувальних машин електроприводів, з урахуванням різних способів регулювання їх параметрів;
- дослідити можливість впровадження групового керування механізмами ВП ТЕС, що приводяться в дію АД;
- розробити методи визначення оптимальної групової частоти живильної напруги АД при впровадженні групового керування механізмами ВП ТЕС, що враховують режими роботи групового споживача ВП ТЕС;
- дати практичні рекомендації щодо застосування результатів досліджень з метою підвищення енергоефективності системи власних потреб Харківської ТЕЦ-3.

Об'єкт досліджень – фізичні процеси роботи електротехнічного та електромеханічного обладнання систем власних потреб ТЕС.

Предмет досліджень – параметри та характеристики основних споживачів електричної енергії в системах власних потреб ТЕС.

Методи дослідження. В основу дисертаційної роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, який базується на методах математичного моделювання; чисельних методах вирішення нелінійних рівнянь; використанні методу найменших квадратів для апроксимації табличних паспортних характеристик ВМ; лінійної інтерполяції дискретних значень для визначення характеристик основного устаткування ТЕС; дискретного багатовимірного пошуку для визначення максимальних значень функції ККД при вирішенні задачі знаходження оптимальних параметрів керування ВМ, що приводяться в дію АД; методах статистики при аналізі структури споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 1) Отримали подальший розвиток математичні моделі основних механізмів ВП ТЕС, які на відміну від відомих дозволяють провести уточнений

аналіз і отримати загальну характеристику споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС в різних режимах роботи.

2) Науково обґрунтовані основні засади виконання енергозаощаджуючих заходів за рахунок виділення груп споживачів електричної енергії з близькими режимами роботи в системах власних потреб ТЕС, що дозволило знизити капіталовкладення при проведенні модернізації.

3) Вперше отримано метод визначення електричної потужності групового споживача ВП ТЕС, який враховує спосіб регулювання його параметрів, що дозволяє визначити загальний потенціал енергозбереження.

4) Вперше запропоновано метод визначення оптимальної групової частоти живильної напруги АД для різних груп механізмів ВП ТЕС, що враховує режим роботи групового споживача ВП ТЕС та його середньозважений ККД, що дозволило досягти зменшення споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС.

Практичне значення одержаних результатів для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

- розроблено алгоритм впровадження групового керування механізмами ВП ТЕС, що приводяться в дію АД за рахунок використання спільного ПЧ, що дає змогу значно зменшити капіталовкладення при модернізації систем власних потреб ТЕС та має значний потенціал енергозаощадження;

- розроблена методика знаходження оптимальної частоти живильної напруги групового споживача ВП ТЕС при впровадженні групового способу керування механізмами ВП ТЕС;

- надані практичні рекомендації щодо модернізації розподільчого пристрою власних потреб 6 кВ Харківської ТЕЦ-3 при впровадженні групового керування механізмами ВП ТЕС.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені:

- у філії ТЕЦ-3 КП «ХТМ» для проекту модернізації систем власних потреб станції у вигляді практичних рекомендацій щодо зміни схеми розподільчого пристрою власних потреб 6 кВ та даних для техніко-економічного обґрунтування впровадження групового способу керування механізмами ВП ТЕЦ;

- у навчальному процесі кафедри електричних станцій Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” для студентів першого та другого рівнів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за спеціалізаціями: 141-01 «Електричні станції» та 141-05 «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» під час викладання курсів лекцій з дисциплін «Системи власних потреб електричних станцій», «Експлуатація і режими роботи електрообладнання електричних станцій», «Оптимізація режимів роботи електричних станцій».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Серед них – виконання основного об’єму теоретичних та експериментальних досліджень, викладених у дисертаційній роботі, включаючи розробку математичних моделей ВМ як навантажувальних машин електроприводів, узагальнення та перевірку отриманих

експериментальних даних та їх оформлення у вигляді наукових публікацій та доповідей за темою дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week) (Харків, 2020), Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (м. Харків, 2020 р.), IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (Київ, 2019), XIX Міжнародний симпозиум «Методи дискретний особливостей в задачах математичної фізики» (м. Одеса, 2019р.), IV Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання і оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2018 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2018р.), 25-а міжнародна науково-практична конференція MicroCAD–2017 (м. Харків, 2017 р.), IV Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку - 2017» (м. Київ, 2017 р.), VII Міжнародна науково-практична конференція пам'яті І.І. Мартиненка та з нагоди 85-річчя Таврійського державного агротехнічного університету «Енергозабезпечення технологічних процесів» (м. Мелітополь, 2017р.), XXII Міжнародна науково-технічної конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Одеса, 2016 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових праць, 3 рецензується у наукометричній базі Scopus, 9 – у фахових виданнях України, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 179 сторінок; з них 62 рисунок по тексту; 9 рисунків на 7 окр. Сторінках; 12 таблиць по тексту; списку із 110 найменувань використаних джерел на 14 сторінках; 2 додатків на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну, особистий внесок здобувача та практичне значення роботи.

У **першому розділі** дана характеристика систем власних потреб ТЕС, розглянуті основні типи приводів механізмів ВП що використовуються в них. Наведені основні схеми електропостачання електричного обладнання механізмів ВП для різних типів станцій, зазначені їх переваги та недоліки. Дана характеристика різних видів джерел електропостачання розподільчих пристроїв власних потреб ТЕС. Дані визначення основному та допоміжному устаткуванню ТЕС.

Розглянуті сучасні способи регулювання параметрів механізмів ВП, такі як дроселювання, байпасування, зміна кута відкриття направляючого апарату, зміна швидкості обертання робочого колеса за рахунок регулювання частоти живильної

напруги електричних двигунів, що приводять їх в дію. На рис.1 порівняні відносні потужності при різних способах регулювання параметрів механізмів ВП.

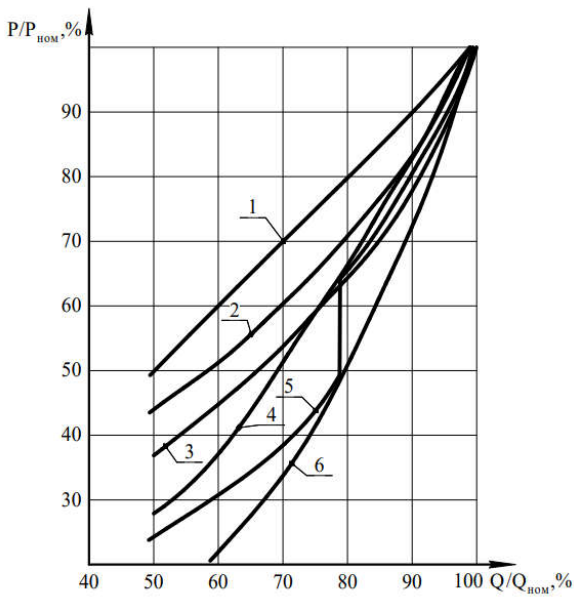


Рисунок 1 – Порівняння різних способів регулювання ВМ:

- 1- дрельне регулювання; 2 – спрощений апарат УНА; 3 – осьовий апарат ОНА; 4 – гідромуфта; 5 – двошвидкісний електродвигун з осьовим направляючим апаратом; 6 – частотно-регульований привод.

основним чинником, що впливає на енергоефективність роботи устаткування є режим його роботи. Найбільш перспективним шляхом у вирішенні задачі підвищення енергоефективності систем власних потреб ТЕС є впровадження енергоефективних способів регулювання параметрів механізмів власних потреб, а саме використання частотно-регульованого приводу.

Значний вклад у вирішення задачі підвищення енергоефективності систем власних потреб ТЕС зробили такі вчені як Лазарев Г. Б., Лезнов Б. С., Дьяков А. Ф., Сивокобиленко В. Ф., Шакарян Ю. Г., Єрмілова С. Ф., Мемон А. Г., U. R. Yaragatti. Найбільш прогресивними світовими корпораціями, що випускають сучасне обладнання для систем власних потреб, є ABB, Siemens, Schneider Electric.

В другому розділі виконаний аналіз впливу режимів роботи ТЕС на режими роботи їх механізмів ВП, окремо наведений аналіз режиму роботи ТЕЦ за тепловим графіком навантаження. Були визначені фактори, які призводять до роботи основного та допоміжного устаткування на часткових навантаженнях.

Проведений аналіз структури споживання електричної енергії в системах власних потреб ТЕС. Наведені чинники, що впливають на величину споживання електричної енергії на власні потреби для різних типів ТЕС. Показано, що частка споживання електричної енергії на власні потреби може значно перевищувати нормативні показники та сягати 30-50 % від рівня генерації. Приведений графік генерації та споживання електричної енергії на власні потреби на прикладі

Основними споживачами електричної енергії на ТЕС є АД з короткозамкненим ротори, що приводять в дію ВМ – насоси та вентилятори. Дані механізми забезпечують роботу основного устаткування станції. Приведені характеристики та вимоги до їх електроприводів.

Надана характеристика АД, приведені їх робочі характеристики та енергетична діаграма. Показано, що втрати електричної енергії у АД включають постійну та змінну складові. Змінні втрати залежать від навантаження на валу двигуна. Зміна частоти живильної напруги – це найбільш ефективний спосіб регулювання швидкості обертання ротора АД, оскільки двигун працює у всьому діапазоні регулювання з малим ковзанням, а тому потужність ковзання мінімальна.

Проведений аналіз сучасних підходів до підвищення енергоефективності в системах власних потреб ТЕС. Відмічено, що

Харківської ТЕЦ-3 (рис. 2), з якого видно, що частка споживання електричної енергії значно зростає в літні місяці, коли теплове навантаження ТЕЦ зменшується.

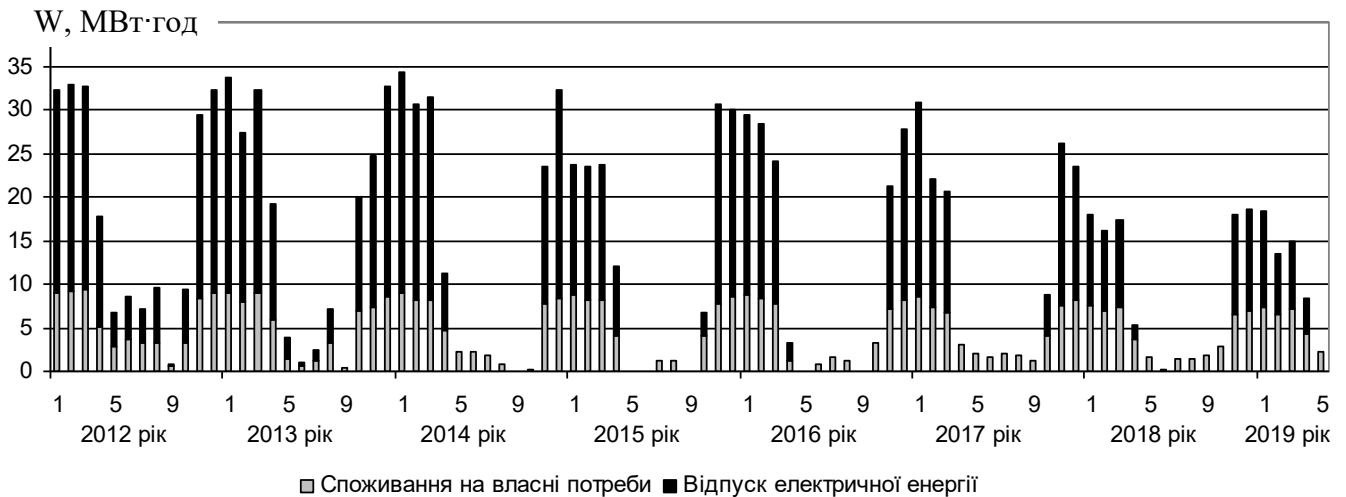


Рисунок 2 – Статистика споживання електричної енергії на власні потреби на типовій ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження

Високе споживання електричної енергії на ТЕЦ зумовлено значною встановленою потужністю АД, що приводять в дію механізми власних потреб, за рахунок устаткування теплового розподільчого пункту (мережеві насоси) та устаткування пікової водогрійної котельної. Приведена структура споживання електричної енергії за групами механізмів ВП для типової ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження в літній та зимовий періоди (рис. 3)



Рисунок 3 – Структура споживання електричної енергії на власні потреби типової ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження:

а – типовий зимовий місяць; б – типовий літній місяць

ХОВ - цех хімічної очистки води; ПВК – пікова водогрійна котельня

Проведений аналіз ефективності різних способів регулювання параметрів ВМ. Показано, що найбільш ефективним способом регулювання є використання частотно-регульованого приводу.

Надана характеристика групового керування механізмами власних потреб ТЕС. Приведені приклади групового керування за рахунок зміни рівня напруги та зміни частоти живильної напруги. Груповий споживач ВП ТЕС – сукупність механізмів ВП ТЕС, що приводяться в дію електричними двигунами, мають

близькі характеристики в різних режимах роботи та можуть брати участь у груповому керуванні ними.

За результатами дисертаційного дослідження та на основі аналізу літературних джерел були виділені наступні переваги впровадження групового регулювання частоти живильної напруги АД, що приводять в дію механізми ВП ТЕС, а саме: значна економія коштів за рахунок зменшення капіталовкладень при проведенні модернізації систем власних потреб ТЕС; скорочення масштабу, складності та вартості проектування; зниження навантаження на двигуни електроприводу; зменшення вартості обслуговування складного устаткування; зниження складності системи керування устаткування власних потреб ТЕС.

Було виділено ряд обмежень, що значно зменшує сферу використання групового регулювання частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію механізми ВП ТЕС, таких як: робота двигунів з однаковою частотою живильної напруги; урахування групового перетворювача частоти як єдиного елементу можливої відмови; необхідність збільшення потужності групового перетворювача частоти; застосування скалярного керування групою механізмів ВП; застосування індивідуальних пристроїв захисту на кожен з механізмів групи.

Проведено аналіз існуючих підходів до класифікації механізмів ВП ТЕС. Запропонований новий підхід до їх класифікації, що базується на близькості та схожості технологічних характеристик, використанні асинхронного електроприводу, рівності величин живильної напруги, залежності режиму роботи механізму від режиму роботи основного устаткування станції, можливості впровадження частотного регулювання параметрів механізму. Приведений приклад класифікації устаткування власних потреб Харківської ТЕЦ-3 (рис. 4).



Рисунок 4 - Класифікація механізмів власних потреб ТЕС:

ЖЕН – живильний електронасос; ДВ – дуттьовий вентилятор; Д – димосос;
 КН – конденсаційний насос; КНБ – конденсаційний насос бойлерів; ЦН – циркуляційний насос;
 МН – мережевий насос; НПТМ – насос пресування теплових мереж; НРВ – насос рециркуляції води; ЦВП – цех водо підготовки

У третьому розділі були розглянуті питання моделювання режимів роботи механізмів ВП ТЕС, як навантажувальних машин електроприводів. При розробці і використанні математичних моделей моделювалися лише сталі режими роботи устаткування ТЕС. Проведений аналіз існуючих математичних моделей ВМ.

Приведена математична модель АД, як споживача електричної енергії, що

враховує можливість регулювання частоти живильної напруги. ККД АД при регулюванні частоти має вигляд

$$\eta_{АД} = \frac{P_{мех}}{P_{мех} + \Delta P_{зм.ном} K^2 + \Delta P_{ст.ном} \beta^{\frac{n}{2}+q} + \Delta P_{мх.ном} \beta^2 + \Delta P_{щном} \beta^n}, \quad (1)$$

де $P_{мех}$ - потужність на валу АД; $\Delta P_{зм.ном}$ - змінні втрати потужності в АД, Вт; $\Delta P_{мх.ном}$ - номінальні механічні втрати в АД, Вт; $\Delta P_{ст.ном}$ - номінальні втрати в сталі АД, Вт; $\Delta P_{щном}$ - втрати в обмотці статора АД від протікання номінального намагнічувального стуму, Вт.

Розроблена математична модель ВМ як навантажувальної машини електроприводу. ВМ та мережа, на яку він працює, утворюють єдину технічну систему «відцентровий механізм - мережа», стан якої визначається наступними величинами: Q – продуктивність механізму, м³/год; H - напір, що розвиває механізм, м; n – швидкість обертання робочого колеса, об/хв; α - кут відкриття направляючого апарату, град; ξ – еквівалентний гідравлічний опір мережі.

В загальному вигляді роботу ВМ на мережу можна описати наступною залежністю

$$\Psi(\alpha, Q, n, \xi) = H(Q, \alpha, n) - H_M(Q, \xi) = 0. \quad (2)$$

Як відомо, для АД з коротко замкнутим ротором частота живильної напруги зв'язана з швидкістю обертання ротора за допомогою наступного співвідношення

$$n(f) = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s). \quad (3)$$

Технологічний процес вироблення електричної та теплової електричної енергії на ТЕС є складним, а тому для нормального функціонування її основного устаткування використовується велика кількість допоміжних ВМ, які з'єднані за різними схемами. Основними схемами з'єднання є послідовне, паралельне та змішане. В розділі приводяться алгоритми побудови еквівалентної характеристики групи ВМ як навантажувальних машин електроприводів, з використанням графічних та чисельних методів для різних схем з'єднання ВМ в гідравлічних мережах ТЕС.

При моделюванні ВМ, як навантажувальних машин, електроприводів вихідними даними є їх паспортні характеристики. Для вентиляторів це залежності напору та ККД механізму від продуктивності та кута відкриття направляючого апарату, а для насосів – залежність напору та ККД від продуктивності при номінальній швидкості обертання, що відповідає частоті живильної напруги мережі – 50 Гц. За паспортними даними механізмів знімаються таблиці ($N \times M$) значень виду (a_i, Q_j, H_{ij}) та (a_i, Q_j, η_{ij}) де $i = 1 \dots N, j = 1 \dots M$, та за допомогою методу найменших квадратів визначається функція інтерполяції напору та ККД механізму у вигляді:

$$\tilde{H}(\alpha, Q, n(f_0)) = h_0 + h_1 \alpha + h_2 Q + h_3 \alpha Q + h_4 \alpha^2 + h_5 Q^2, \quad (4)$$

$$\tilde{\eta}(\alpha, Q, n(f_0)) = k_0 + k_1 \alpha + k_2 Q + k_3 \alpha Q + k_4 \alpha^2 + k_5 Q^2. \quad (5)$$

Для ВМ характерні наступні закони подібності:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}, \quad \frac{\tilde{H}}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2, \quad (6)$$

де Q – актуальна продуктивність ВМ, м³/год; Q_0 – номінальна продуктивність ВМ, м³/год; \tilde{H} – актуальний напір, м; H_0 – номінальний напір, м.

З урахування (6) відтворені вирази для знаходження, відповідно, напору та ККД відцентрового механізму як функції продуктивності, кута відкриття направляючого апарату та частоти живильної напруги:

$$\tilde{H}(\alpha, Q, f) = \left(h_0 + h_1\alpha + h_2Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_3\alpha Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_4\alpha^2 + h_5 \left[Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2 \right) \left(\frac{n(f)}{n(f_0)} \right)^2, \quad (7)$$

$$\tilde{\eta}(\alpha, Q, f) = k_0 + k_1\alpha + k_2Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + k_3\alpha Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + k_4\alpha^2 + k_5 \left[Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2. \quad (8)$$

На рис. 5 показні поверхні напору та ККД вентилятора ВДН-17-3 при номінальній частоті живильної напруги, побудовані за допомогою (7-8).

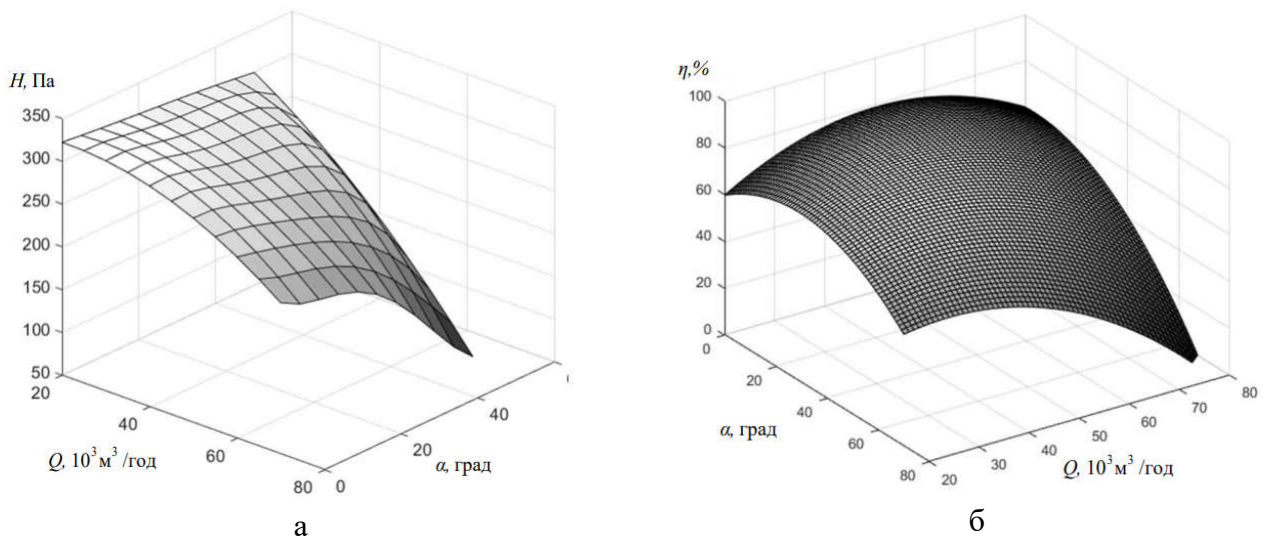


Рисунок 5 – Побудовані характеристики вентилятора ВДН-17-3:
а – характеристика напору; б – характеристика ККД

Потужність на валу АД, що приводить в дію ВМ з характеристиками (7-8) може бути розрахована за формулою

$$P_{\text{мех}} = \frac{Q\rho gH}{1000\eta_{\text{н}}}. \quad (9)$$

Електрична потужність, що споживається АД, що приводить в дію ВМ з мережі, з урахуванням (1) можна знайти у вигляді

$$P_{\text{АД}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\text{АД}}(P_{\text{мех}})}. \quad (10)$$

У четвертому розділі поставлені та вирішені задачі визначення оптимальної частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію ВМ, при різних способах регулювання їх параметрів. Для цього був проведений аналіз можливості змішаного керування ВМ, при якому регулювання ВМ проводиться

двома способами одночасно: зміною частоти живильної напруги АД та кута відкриття направляючого апарату для вентиляторів і зміною частоти живильної напруги АД та дроселюванням для насосів. Після чого було поставлено та вирішено 3 задачі оптимального керування.

Задача 1. Визначити оптимальні параметри керування для одного ВМ, що приводиться в дію АД та працює на гідравлічну мережу. ВМ, який заданий його апроксимованою напірною характеристикою (7), повинен забезпечити прокачування середовища через гідравлічну мережу з еквівалентним гідравлічним опором ξ_0 , з продуктивністю Q_0 , при чому параметри керування механізмом повинні забезпечити найбільшу ефективність його роботи, тобто найвищий ККД, який також заданий апроксимованою характеристикою (8).

Задача знаходження оптимальних параметрів керування таким ВМ, що приводиться в дію АД, має вигляд:

$$(f^*, \alpha^*) = \arg \max_{\substack{f \in [f_{\min}, f_{\max}] \\ \alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] \\ \Psi(\alpha, Q, n, \xi) = 0}} \eta(Q, \alpha, f). \quad (11)$$

Функцією мети для такої задачі є характеристика ККД ВМ. Обмеженнями виступають можливі діапазони регулювання частоти та кута відкриття направляючого апарату, а також функція стану системи «ВМ – мережа» (2).

Для вирішення такої задачі застосовано графічний спосіб. Виразивши з рівняння (2) значення продуктивності ВМ у вигляді

$$Q = Q(\alpha, f, \xi_0), \quad (12)$$

побудовано в осях координат $\langle Q, \alpha, f \rangle$ поверхню продуктивності, яку може забезпечити ВМ (рис. 6). Перетнувши дану поверхню площиною $Q=Q_0$, було отримано криву

$$\begin{cases} \alpha = \alpha(f) \\ Q = Q_0 \end{cases}, \quad (13)$$

слід якої на площині $\langle \alpha, f \rangle$ відповідає функції кута відкриття направляючого апарату від частоти живильної напруги АД

$$\alpha = \alpha(f). \quad (14)$$

Далі в осях $\langle \eta, \alpha, f \rangle$ (рис. 7) побудовано графік функції (14), та криву, що відповідає значенням відтвореного ККД ВМ

$$\begin{cases} \eta = \eta(\alpha, f, Q_0) \\ \alpha = \alpha(f) \end{cases}, \quad (15)$$

яка визначає можливі комбінації частоти живильної напруги АД та кута відкриття направляючого апарату для забезпечення заданої продуктивності, та знайдене максимальне значення ККД та параметри керування ВМ що приводиться в дію АД - (f^*, α^*) , що відповідають цьому значенню.

Задача 2. Визначити оптимальні параметри керування групою з N ВМ з регульованим електроприводом, режими роботи яких не залежать один від одного. Кожен з ВМ заданий його апроксимованими напірними характеристиками (6) і повинен забезпечити прокачування середі через відповідну гідравлічну

мережу з еквівалентним гідравлічним опором ξ_l , з продуктивністю Q_i , де $i=1..N$, при чому параметри керування механізмами групи повинні забезпечити найбільш ефективну їх роботу.

Критерієм ефективності роботи групи ВМ, що приводяться в дію АД в даному випадку виступає середньозважений ККД групи, що визначається за наступним співвідношенням

$$\eta = \frac{\sum P_i \eta_i(\alpha_i(f), Q_i, f)}{\sum P_i}, \quad (16)$$

де P_i – потужність, що споживається i -тим АД, що приводить в дію ВМ при заданому режимі його роботи, кВт.

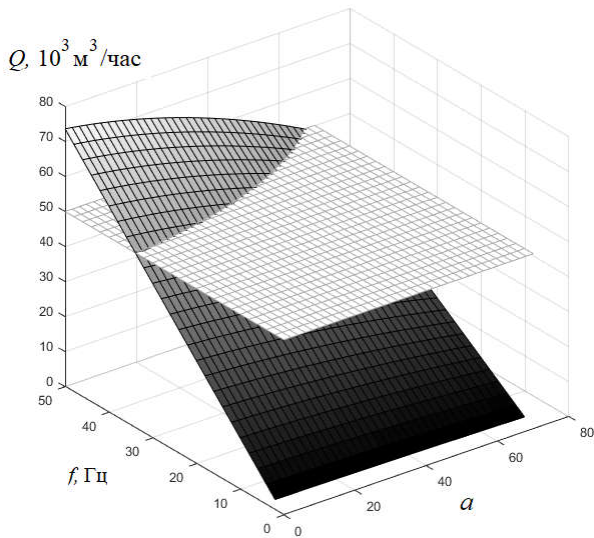


Рисунок 6 – Побудова поверхні продуктивності, що забезпечує ВМ

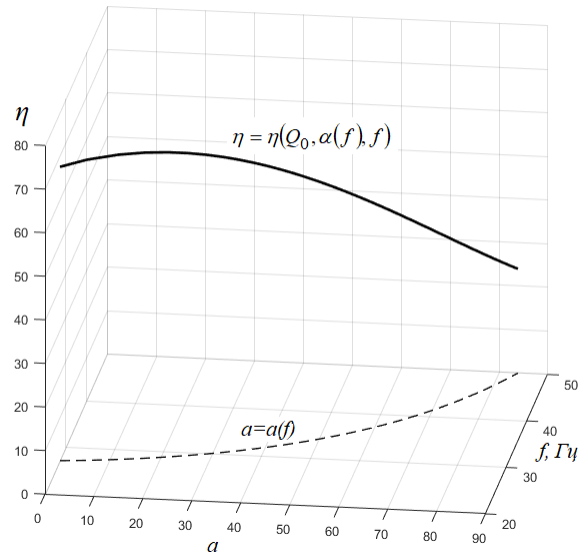


Рисунок 7 – Побудова кривої ККД для визначення оптимальних параметрів керування ВМ

Ще одним обмеженням виступає живлення групи АД, що приводять в дію ВМ, від одного групового ПЧ при впровадженні групового регулювання частоти живильної напруги, тобто має місце рівність

$$f_1 = f_2 = \dots = f_i = \dots = f_N = f = \text{var}.$$

Виходячи з цього, задача знаходження оптимальних параметрів керування ВМ групи приймає вигляд:

$$(f^*, \bar{\alpha}^*) = \arg \max_{\substack{f_i \in [f_{i,\min}, f_{i,\max}], i=1..N \\ \alpha_i \in [\alpha_{i,\min}, \alpha_{i,\max}], i=1..N \\ \Psi_i(\alpha_i, Q_i, f, \xi) = 0, i=1..N}} \frac{\sum_{i=1}^N P_i \eta_i(\alpha_i(f), Q_i, f)}{\sum_{i=1}^N P_i}. \quad (17)$$

Графічний спосіб вирішення даної задачі показаний на рис. 8-9.

Більш складною задачею є задача знаходження оптимальних параметрів управління групою ВМ, що приводяться в дію АД, які працюють скоординовано в спільній гідравлічній мережі та їх режими роботи впливають один на одного. Прикладом такої системи є газоповітряний та живильний тракти парового енергетичного котла.

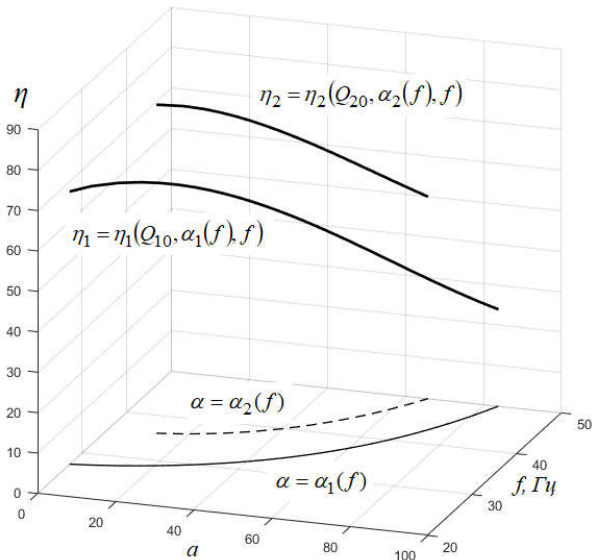


Рисунок 8 – Побудова кривих ККД для кожного з механізмів групи

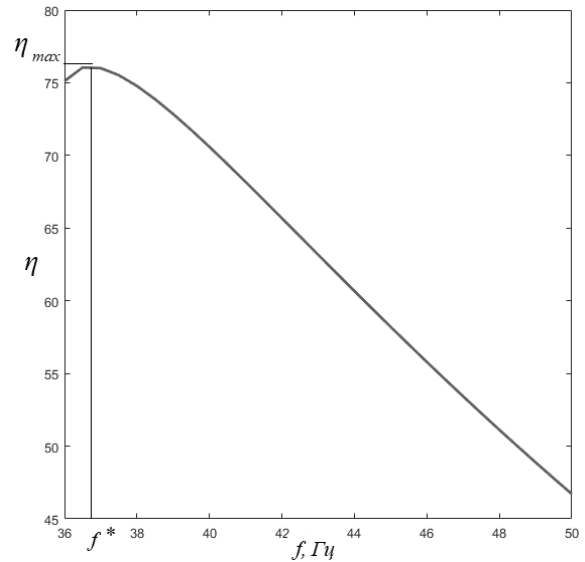


Рисунок 9 – Середньозважений ККД як функція від групової частоти живильної напруги

Задача 3. Визначити оптимальні параметри керування групою з N ВМ, що приводяться в дію АД, режими роботи яких зв'язані між собою. Кожен з механізмів заданий його апроксимованими напірними характеристиками (7). Механізми працюють в спільній мережі з еквівалентним гідравлічним опором ξ та мають забезпечити продуктивність Q_{Σ}^* . Параметри керування повинні забезпечити найбільш ефективну роботу механізмів групи.

Складність вирішення такої задачі в тому, що необхідно визначити залежність, що описує стан системи

$$\omega(Q_{\Sigma}^*, \vec{\alpha}, \vec{f}) = 0. \quad (18)$$

Для цього складна гідравлічна мережа спрощується, використовуючи особливості паралельної та послідовної роботи ВМ.

Задача знаходження оптимальних параметрів керування матиме вигляд

$$(f^*, \vec{\alpha}^*) = \arg \max_{\substack{f_i \in [f_{i,\min}, f_{i,\max}], i=1..N \\ \alpha_i \in [\alpha_{i,\min}, \alpha_{i,\max}], i=1..N \\ \omega(f, \vec{\alpha}, Q_{\Sigma}^*, \xi) = 0}} \frac{\sum_{i=1}^N P_i \eta_i(\alpha_i(f), Q_i, f)}{\sum_{i=1}^N P_i}. \quad (19)$$

Складність виразу (18) не дозволяє використовувати графічний або аналітичний способи вирішення даної задачі, тому були використані чисельні методи, а саме метод цілеспрямованого пошуку. Суть методу полягає в переборі можливих комбінацій параметрів керування групою ВМ, що приводяться в дію АД, з урахування умов їх спільної роботи та знаходженні максимального середньозваженого ККД групи. В роботі приведені алгоритми чисельного вирішення такої задачі.

Також була розроблена математична модель статички газоповітряного тракту парового енергетичного котла, що враховує можливість дослідження впровадження групового частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію

ВМ, які забезпечують його роботу.

Для групи ВМ парового енергетичного котла MANN-120, були вирішена задача знаходження оптимальних параметрів керування для 3 випадків: при дроселюванні та зміни кута відкриття направляючого апарату (нерегульований електропривод); при використанні індивідуального частотного приводу; при застосуванні групового регулювання частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію ВМ. Графіки зміни оптимальних частот живильної напруги при індивідуальному частотному приводі показані на рис. 10. Порівняльні графіки ефективності кожного зі способів на прикладі ДВ показані на рис. 11.

Як видно з рис. 10 оптимальні частоти живильної напруги при індивідуальному частотному приводі досить близькі для дуттьових вентиляторів та димососів, а тому для них доцільно використовувати груповий спосіб регулювання частоти живильної напруги. Для живильного насосу необхідно використовувати індивідуальний частотний привід, оскільки його оптимально частота живильної напруги значно відрізняється від інших механізмів. На рис. 11 представлені графіки зміни ефективності регулювання продуктивності дуттьовим вентилятором при різних способах регулювання. Як видно з рис. 11, найбільш ефективним способом є саме використання індивідуального частотного приводу, але використання групового приводу також є ефективним рішенням, перевагою якого є значно менші капіталовкладення при проведенні модернізації систем власних потреб ТЕС.

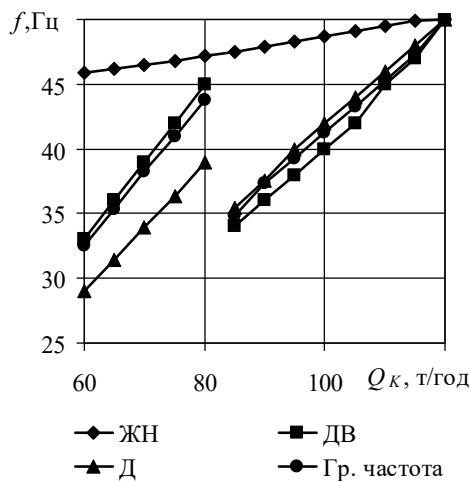


Рисунок 10 – Оптимальні частоти живильної напруги (індивідуальний частотно-регульований привід)

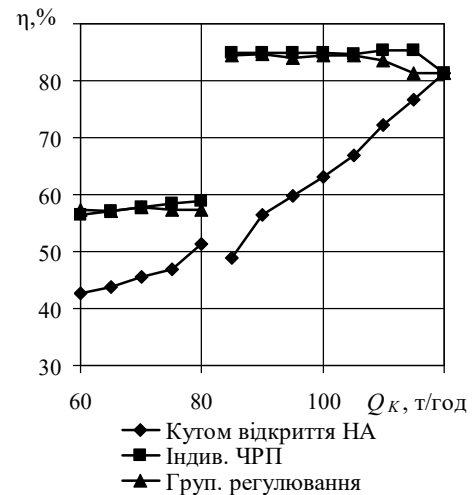


Рисунок 11 – Порівняння ефективності різних способів регулювання параметрів ДВ

У п'ятому розділі на прикладі системи власних потреб Харківської ТЕЦ-3 (ХТЕЦ-3) доведена можливість використання групового регулювання частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію механізми ВП як одного з можливих шляхів проведення модернізації електричної станції. В розділі дана детальна характеристика устаткування станції. Структура встановленої потужності по групам механізмів власних потреб ХТЕЦ-3 представлена на рис. 12.

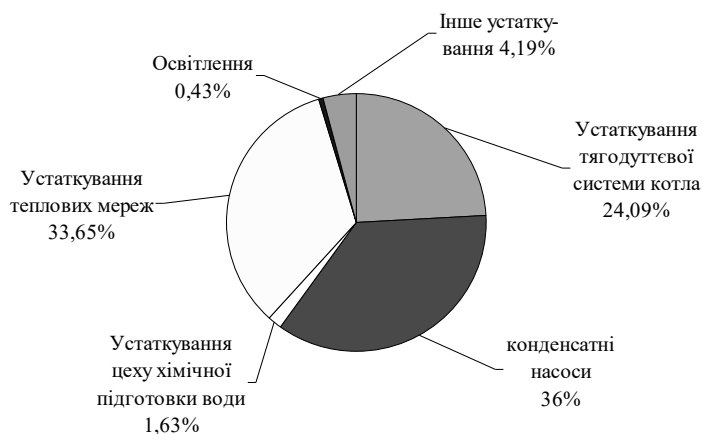


Рисунок 12 – Структура встановленої потужності механізмів власних потреб ХТЕЦ-3

Вихідними даними для дисертаційного дослідження слугували: дані АСКОВЕ; режимні карти парових енергетичних котлів; відомості режимів роботи парових котлів, турбін, насосів; дані самописців теплорозподільчого пристрою.

На основі вихідних даних та запропонованих математичних моделей ВМ як навантажувальних машин електроприводів була побудована комплексна математична модель споживання електричної енергії на власні потреби з можливістю урахування різних способів регулювання продуктивності допоміжного устаткування станції в залежності від режиму роботи її основного устаткування.

Аналіз споживання електричної енергії на власні потреби проводився на основі режиму роботи ТЕЦ в типовий літній місяць, для якого були побудовані графіки генерації та споживання електричної енергії на власні потреби (рис. 13).

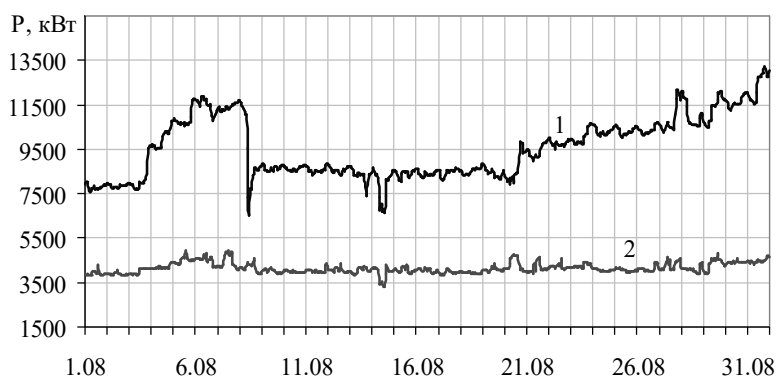


Рисунок 13 – Графік генерації (1) та споживання електричної енергії на власні потреби (2) в типовий літній місяць

Розглянуті особливості режимів роботи основних груп механізмів власних потреб та змодельоване їх споживання електричної енергії при регулюванні їх продуктивності стандартними способами, що використовуються на ХТЕЦ-3 (дроселювання, байпасування, регулювання кута відкриття направляючого апарату при живленні електроприводів від системи власних потреб 6кВ 50 Гц).

Так, для моделювання споживання електричної енергії на власні потреби групою механізмів газоповітряного тракту котла було проведено аналіз систем регулювання, які застосовуються наразі. Використовуючи математичну модель функціонування парового енергетичного котла, були отримані графіки

споживання електричної енергії дуттьовими вентиляторами та димососами котла при регулюванні їх продуктивності за допомогою зміни кута відкриття направляючого апарату при частоті живильної напруги – 50 Гц. Вихідними даними при моделюванні слугували дані паромірів турбогенераторів та відомості операторів котлів середнього та високого тиску.

При моделюванні споживання електричної енергії живильними насосами враховувалися режими їх роботи та гідравлічні схеми живильних трактів котлів ХТЕЦ-3. Як відомо, живильний насос повинен забезпечити продуктивність котла та витрати на продувку, а тому враховувалися витрати живильної води на ці потреби.

В результаті моделювання були отримані графіки споживання електричної енергії живильними насосами ХТЕЦ-3 при регулюванні їх продуктивності дроселюванням при частоті живильної напруги 50 Гц. Вихідними даними слугували відомості операторів котлів та машиністів насосних машинного залу.

При моделюванні режиму роботи та споживання електричної енергії мережевими насосами враховувалися сумарна циркуляція мережевої води через ТРП та гідравлічна схема станції. Оскільки на ХТЕЦ-3 відсутні індивідуальні витратоміри на кожному з мережевих насосів, розподілення мережевої приймалося пропорційно струмам статора кожного з них. В роботі отримані графіки споживання електричної енергії по мережевим насосам ХТЕЦ-3 при регулюванні їх продуктивності дроселюванням при частоті живильної напруги 50 Гц.

На основі вказаних вище допущень була побудована модель споживання електричної енергії на власні потреби ХТЕЦ-3 для типового літнього місяця. Вихідними даними для моделювання був перелік працюючого устаткування, величина циркуляції мережевої води через ТРП станції, продуктивності парових котлів. Точність математичної моделі, що використовувалася, було перевірено на реальних даних двома способами. Перший спосіб полягав у порівнянні сумарного споживання електричної енергії по механізмам на протязі місяця з результатами, отриманими за допомогою моделювання (табл. 1). Як видно з порівняльної таблиці, точність отриманих результатів є достатньою.

Другим способом оцінки точності моделювання є порівняння миттєвих значень поживання електричної енергії по секціям розподільчого пристрою ТЕЦ з результатами моделювання. На рис. 14 показані порівняльні графіки.

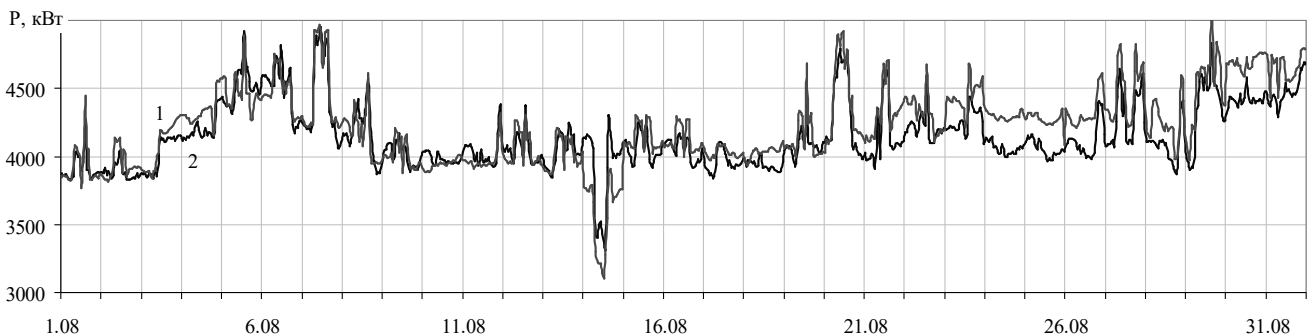


Рисунок 14 – Споживання електричної енергії на власні потреби (1 – фактичне споживання; 2 – результати моделювання)

Таблиця 1 – Результати моделювання споживання електричної енергії механізмами власних потреб Харківської ТЕЦ-3

Механізм	Фактичне споживання, МВт·год	Результати моделювання, МВт·год	Відхилення	Примітки
МН-5	61	55,7	8,69%	Фактичне споживання електричної енергії групою мережевих насосів – 1413 МВт·год, Результати моделювання для групи насосів – 1305,6 МВт·год Відхилення для групи – 7,5%
МН-12	407	412,9	-1,45%	
МН-13	453	400,5	11,59%	
МН-14	492	437,5	11,08%	
Д-5А	133	111,2	16,39%	Фактичне споживання – 229 МВт·год Результати моделювання – 222,4 МВт·год Відхилення для групи – 2%
Д-5Б	96	111,2	-15,83%	
ВГД-5А	62	68	-9,68%	–
ЖЕН-8	396	382	3,54%	–

Як показало порівняння результатів моделювання з фактичним споживанням електричної енергії на власні потреби, запропоновані математичні моделі механізмів власних потреб можна використовувати при дослідженні режимів споживання електричної енергії на власні потреби.

Використовуючи запропоновану математичну модель споживання електричної енергії на власні потреби, було досліджено можливість впровадження індивідуального частотного приводу та групового регулювання частоти живильної напруги для АД, що приводять в дію механізми ВП. Результати дисертаційного дослідження показали, що для групи мережевих насосів, що приводяться в дію АД доцільно використовувати існуючі способи регулювання – дроселювання та зміни числа працюючих насосів, оскільки дані механізми працюють в режимах роботи близьких до номінальних; для режимів роботи живильних насосів характерне глибоке регулювання їх продуктивності, тому для їх ефективного приводу доцільно використовувати індивідуальний частотний привід; механізми тяго-дугтьового тракту котла мають схожий режим роботи та характеристики, а тому для приводу таких механізмів доцільно використовувати саме групове регулювання частоти живильної напруги.

На основі результатів математичного моделювання буда розрахована очікувана економія електричної енергії для типового літнього місяця, яка складає: при впровадженні індивідуального частотного приводу для ЖЕН №8 – 58204,1 кВт·год, що відповідає зниженню споживання електричної енергії живильним насосом на 15,23%; при впровадженні групового регулювання частоти живильної напруги електроприводів механізмів газоповітряного тракту котла К-5 – 211132,8 кВт·год, що відповідає зниженню споживання електричної енергії ними на 72,68%. Запропоновані енергоефективні заходи можуть зменшити споживання електричної енергії на власні потреби в цілому на 269336,9 кВт·год, що відповідає 10,69% від споживання на власні потреби по Харківській ТЕЦ-3. Графік

прогнозованого споживання електричної енергії з урахуванням зазначених вище заходів з енергозбереження приведені на рис. 15.

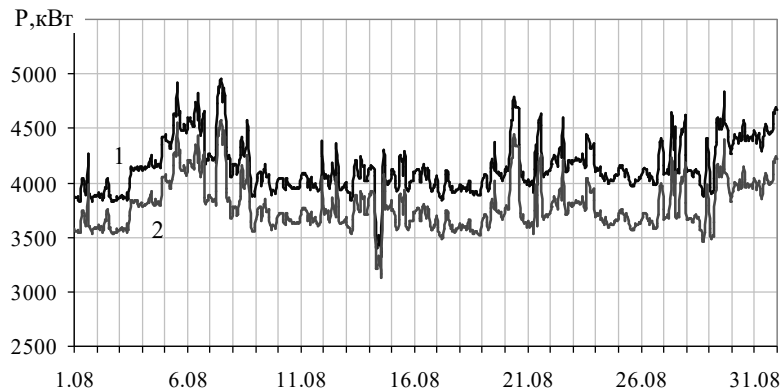


Рисунок 15 – Очікуване зниження споживання електричної енергії на власні потреби ХТЕЦ-3

1 – реальне споживання; 2 – прогнозоване, з урахуванням заходів з енергозбереження

В умовах ХТЕЦ-3 доцільно використовувати групове регулювання продуктивності для механізмів тяго-дутьового тракту котла. Оскільки розподільчий пристрій власних потреб 6 кВ ХТЕЦ-3 виконаний за схемою з двома системами шин, пропонується підключити груповий перетворювач частоти до робочої системи шин, а його вихід на резервну. Механізми групи пропонується за допомогою розвилки роз'єднувачів переключати на резервну систему шин, що дасть змогу більш гнучко керувати складом групи механізмів, які беруть участь у груповому регулюванні.

Система керування устаткуванням станції пропонується організувати на двох рівнях: загальному, на якому за режимом роботи основного устаткування визначається спільна групова частота живильної напруги, та індивідуальному, що відповідає за регулювання окремих механізмів групи існуючими класичними способами.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу по підвищенню енергоефективності та зменшення витрат електричної енергії в системах власних потреб ТЕС за рахунок групового керування механізмами власних потреб ТЕС, що приводяться в дію асинхронними двигунами. На базі математичних моделей була отримана прогнозована економія електричної енергії при впровадженні групового керування механізмами власних потреб Харківської ТЕЦ-3.

Можна виділити наступні найбільш важливі наукові та практичні результати:

1. Досліджена структура та приведена характеристика споживання електричної енергії за групами механізмів власних потреб ТЕС, що ґрунтується на аналізі режимів роботи ТЕС, структури споживання електричної енергії по групам

споживачів електричної енергії та статистичних даних по споживанню електричної енергії на власні потреби.

2. Наведено аналіз основних способів регулювання продуктивності механізмів ВП ТЕС та їх ефективності. Визначено, що найбільш ефективним способом регулювання є індивідуальний частотно-регульований електропривод. На прикладі Харківської ТЕЦ-3 показано, що для групи мережевих насосів доцільно використовувати дроселювання та зміну числа працюючих мережевих насосів, для живильних насосів ТЕЦ використовувати індивідуальний частотний привід, а для механізмів газоповітряного тракту котла - групове керування.

3. Розвинуті математичні моделі ВМ, як навантажувальних машин електроприводів з урахуванням основних способів регулювання їх параметрів. В роботі показано, що результати моделювання споживання електричної енергії на власні потреби мають досить високу точність, що дає можливість використовувати дані математичні моделі в подальшому дослідженні режимів роботи ТЕС та техніко-економічних розрахунків при проведенні модернізації їх систем власних потреб.

4. Досліджена можливість впровадження групового керування механізмами власних потреб ТЕС, що приводяться в дію асинхронними двигунами, для впровадження якого повинен бути виділений груповий споживач ВП ТЕС.

5. Розроблений метод визначення оптимальної частоти живильної напруги при груповому керуванні механізмами ВП ТЕС, який полягає у вирішенні задачі оптимального керування групою ВМ. Для такої задачі вихідними параметрами є паспортні дані устаткування ТЕС, режими роботи групового споживача ВП ТЕС. Обмеженнями при вирішенні такої задачі є конструктивні особливості регуляторів та електроприводів, спільний режим роботи устаткування та мережі.

6. Надані практичні рекомендації щодо модернізації системи власних потреб Харківської ТЕЦ-3 при впровадженні групового керування механізмами ВП ТЕС, що приводяться в дію АД. Визначена очікувана економія споживання електричної енергії на власні потреби, яка в типовий літній місяць становить 269336,9 кВт·год, що відповідає зниженню споживання електричної енергії на власні потреби у розмірі 10,69%. Приведена схема вмикання групового ПЧ в розподільчому пристрої ВП 6 кВ, та рекомендації, щодо перспективної АСУ ТП Харківської ТЕЦ-3.

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені у філії КП «ХТМ» Харківська ТЕЦ-3 та у навчальний процес в НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kruhol M. Assessment of Group Regulation Feasibility in Thermal Power Plant Auxiliaries Capacity Control / M. Kruhol, O. Lasurenko, V. Vanin. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies.– 2020. – Vol. 6, No. 8(108). – P. 45–53.

Здобувачем проведений аналіз споживання електричної енергії на власні потреби ТЕЦ, приведена математична модель відцентрового механізму, як навантажувальної машини електроприводу. Поставлена й вирішена задача

знаходження оптимальних параметрів керування групою відцентрових механізмів, що забезпечують роботу парового енергетичного котла.

2. Кругол М. М. Математичне моделювання одноступового газогідравлічного тракту допоміжних механізмів парового котла теплової електричної станції / В. А. Ванін, М. М. Кругол, О. П. Лазуренко // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2020. – № 1. – С. 3–14.

Здобувачем приведені алгоритми вирішення задачі оптимального керування механізмами власних потреб ТЕС. Приведені результати моделювання споживання електричної енергії на ВП для Харківської ТЕЦ-3.

3. Кругол Н. М. Математическое моделирование режимов регулирования газоздушного тракта котла ТЭС / Б. В. Ванин, В. А. Ванин, Н. М. Кругол // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2020. - № 1(1355). – С.8–15.

Здобувачем приведена математична модель функціонування газоповітряного тракту котла. Вирішена задача оптимального керування групою відцентрових механізмів, що забезпечують роботу парового енергетичного котла.

4. Кругол Н. М. Математические модели систем обеспечения работы котлоагрегата ТЭС в задаче повышения его энергоэффективности / А. П. Лазуренко, В. А. Ванин, Н. М. Кругол // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2019. – № 8(1333). – С. 41–48.

Здобувачем розроблені математичні моделі відцентрових механізмів та представлений алгоритм знаходження оптимальної частоти живильної напруги при груповому керуванні ними.

5. Кругол М. М. Оптимальное электромеханическое управление гидродинамическими системами / В. А. Ванін, М. М. Кругол, О. П. Лазуренко // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Сер. : Проблеми енергозбереження та енергозабезпечення в АПК України. – 2018. – № 195. – С. 18–20.

Здобувачем запропонований спосіб визначення оптимальної частоти живильної напруги при груповому керуванні механізмами власних потреб ТЕС.

6. Кругол Н. М. Повышение энергоэффективности работы ТЭС за счет снижения потребления электроэнергии на собственные нужды / А. П. Лазуренко, Г. И. Черкашина, Н. М. Кругол // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 2. – С. 82–90.

Здобувачем розглянуті режими роботи основного та споміжного устаткування ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження. Приведені результати моделювання режимів роботи відцентрових механізмів. Приведені порівняльні характеристики між споживання електричної енергії при дроселюванні та використанні частотного приводу для деяких механізмів власних потреб ТЕС.

7. Кругол М. М. Моделювання режиму роботи групи мережевих насосів при роботі ТЕЦ по тепловому графіку навантаження в літній період / А. В. Ивахнов, М. М. Кругол, О. П. Лазуренко // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Энергетика: надійність та енергоефективність. – 2017. – № 31(1253). – С. 78–82.

Здобувачем приведені результати моделювання режиму роботи групи мережесих насосів ТЕЦ. Показано, що використання запропонованих математичних моделей має досить високу точність отриманих результатів.

8. Кругол М. М. Новий підхід до класифікації електроустаткування власних потреб теплових електричних станцій / М. М. Кругол, О. П. Лазуренко // Електротехніка та Електромеханіка. Спеціальний випуск. – 2016. – № 4(1) – С. 43–47.

Здобувачем проведений аналіз основних підходів до класифікації устаткування власних потреб ТЕС, та розроблений новий підхід до їх класифікації, що базується на залежності режиму їх роботи від режиму роботи основного устаткування ТЕС. Приведена структура споживання електричної енергії по групам механізмів власних потреб, на прикладі Харківської ТЕЦ-3.

9. Кругол Н. М. Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ для повышения КПД в летний период / А. П. Лазуренко, Н. М. Кругол // Вісник НТУ «ХП». Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2014. – № 56(1098). – С. 78–82.

Здобувачем приведено аналіз можливості впровадження групового керування механізмами власних потреб ТЕЦ. Приведені результати моделювання групи механізмів тяго-дутьового тракту парового енергетичного котла.

10. Кругол Н. М. Анализ работы ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период / А. П. Лазуренко, Н. М. Кругол // Вісник НТУ «ХП». Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2013. – № 59(1032). – С. 79–83.

Здобувачем проведено аналіз роботи ТЕЦ по тепловому графіку навантаження. Запропонована можливість використання групового керування механізмами власних потреб ТЕЦ.

11. Kruhol M. An Algebraic Model of Gas-Hydraulic Network of Mechanisms with Electric Drive in the Problem of Thermal Power Plant Auxiliaries Optimization M. Kruhol, O. Lasurenko, V. Vanin // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (IEE KhPI Week). Conference proceedings, October 5-11, 2020. – Kharkiv, 2020. – P. 188–192.

Здобувачем приведені алгоритми побудови еквівалентних характеристик для груп механізмів власних потреб ТЕС при різних схема їх з'єднання в гідравлічних мережах. Приведений чисельний метод знаходження оптимальної частоти живильної напруги для групи відцентрових механізмів, що приводяться в дію асинхронними двигунами.

12. Кругол М. М. Математичні моделі та оптимізація роботи груп механізмів власних потреб ТЕС / В. А. Ванін, О. П. Лазуренко, М. М. Кругол // Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях. Праці між нар. науково-техн. конф. КМНТ–2020 (Харків 22–24 квітня 2020 р.) – Харків, 2020. – С. 55–58.

Здобувачем проведений алгоритм побудови еквівалентних характеристик ВМ, що приводяться в дію АД.

13. Kruhol N. Group Regulation Efficiency Analysis for Thermal Power Plant Auxiliaries / N. Kruhol, O. Lasurenko, V. Vanin et al. // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). Conference proceedings, April 17-19, 2019. – Kyiv, 2019. – P. 289–293.

Здобувачем приведена методика визначення оптимальної частоти живильної напруги для групи ВМ, що приводяться в дію АД.

14. Кругол М. М. Моделювання в алгебраїчних моделях гідравлічних трактів ТЕС / В. А. Ванін, М. М. Кругол, О. П. Лазуренко // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018) : матеріали IV міжнар. науково-техн. конф. (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 року) – Дніпро, 2018. – С. 44–47.

Здобувачем запропоновані математичні моделі ВМ, що приводяться в дію АД.

15. Кругол Н. М. Особенности применения группового регулирования производительности механизмов собственных нужд ТЭЦ / А. П. Лазуренко, Г. И. Черкашина, Н. М. Кругол // Матеріали VII Міжнар. науково-практ. конф. пам'яті І. І. Мартиненка та з нагоди 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету «Енергозабезпечення технологічних процесів» (8-9 червня 2017 р.). – Мелітополь, 2017. – С. 27–28.

Здобувачем проведений аналіз роботи механізмів власних потреб ТЕЦ.

16. Кругол Н. М. Специфика работы механизмов собственных нужд ТЭЦ, работающей по тепловому графику нагрузки в летний период / А. П. Лазуренко, Н. М. Кругол, А. В. Ивахнов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXV міжнар. науково-практ. конф. MicroCAD–2017, 17-19 травня 2017 р. Ч. II. – Харків, 2017. – С. 213.

Здобувачем виконаний аналіз існуючих способів регулювання параметрів механізмів власних потреб ТЕЦ.

17. Кругол Н. М. Повышение энергоэффективности работы ТЭЦ за счет снижения потребления электроэнергии на собственные нужды / А. П. Лазуренко, Г. И. Черкашина, Н. М. Кругол // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць IV Міжнар. науково-техн. та навч.-метод. конф. у місті Києві 25-27 квітня 2017 р. – Київ, 2017. – С. 40.

Здобувачем проведений аналіз структури споживання електричної енергії на власні потреби для ТЕЦ.

АНОТАЦІЇ

Кругол М. М. Підвищення енергоефективності систем власних потреб теплових електричних станцій. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі у напрямку підвищення енергоефективності систем власних потреб теплових електричних станцій за рахунок впровадження групового регулювання частоти живильної напруги асинхронних двигунів, що приводять в дію механізми власних потреб.

В дисертаційній роботі проведено аналіз структури споживання електричної енергії на власні потреби теплових електричних станцій. Вдосконалений підхід до класифікації механізмів власних потреб, який враховує схожість їх

експлуатаційних режимів та робочих характеристик. Проведений аналіз способів регулювання параметрів відцентрових механізмів, які застосовуються на українських теплових електричних станціях, приведені їх переваги та недоліки. Запропоноване використання групового керування механізмами власних потреб з близькими оптимальними частотами живильної напруги. Розроблені математичні моделі відцентрових механізмів, як навантажувальних машин електроприводу. Поставлені та вирішені задачі знаходження оптимальних параметрів керування механізмами власних потреб при різних способах регулювання їх робочих параметрів. Приведені результати моделювання споживання електричної енергії на власні потреби теплоелектроцентралі впродовж типового літнього місяця, при її роботі за тепловим графіком навантаження. Порівняння результатів моделювання з фактичним споживання електричної енергії вказує на високу точність математичних моделей механізмів власних потреб. Проведений ґрунтовний аналіз можливості впровадження групового керування механізмами власних потреб на Харківській ТЕЦ-3. Показано що даний спосіб керування доцільно використовувати для механізмів газо-повітряного тракту котла, індивідуальний частотний привід для приводу живильних електронасосів, а класичні способи регулювання (дроселювання) на мережевих насосах станції. Дані практичні рекомендації, щодо впровадження групового регулювання частоти живильної напруги електроприводів механізмів власних потреб в умовах Харківської ТЕЦ-3.

Ключові слова: теплові електричні станції, системи власних потреб, механізми власних потреб, групове керування, групове частотне регулювання, асинхронні двигуни, споживання електричної енергії на власні потреби, математичне моделювання, розподільчі пристрої власних потреб

Кругол Н.М. Повышение энергоэффективности систем собственных нужд тепловых электрических станций. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи повышения энергоэффективности систем собственных нужд тепловых электрических станций за счет внедрения группового регулирования частоты питающего напряжения асинхронных двигателей, которые приводят в действие механизмы собственных нужд.

В диссертационной работе проведен анализ структуры потребления электрической энергии на собственные нужды тепловых электрических станций. Улучшен подход к классификации механизмов собственных нужд, который учитывает схожесть их эксплуатационных режимов и рабочих характеристик. Приведен анализ способов регулирования параметров работы центробежных механизмов, которые используются на украинских тепловых электрических станциях, приведены их преимущества и недостатки. Предложено использование группового управления механизмами собственных нужд с близкими оптимальными частото-

тами питающего напряжения. Разработаны математические модели центробежных механизмов как нагрузочных машин электропривода. Поставлены и решены задачи нахождения оптимальных параметров управления механизмами собственных нужд при разных способах регулирования их рабочих параметров. Приведены результаты моделирования потребления электрической энергии на собственные нужды теплоэлектроцентрали на протяжении типового летнего месяца при ее работе по тепловому графику нагрузки. Сравнение результатов моделирования с фактическим потреблением электрической энергии указывает на высокую точность математических моделей механизмов собственных нужд. Проведен детальный анализ возможности внедрения группового управления механизмами собственных нужд на Харьковской ТЭЦ-3. Показано, что данный способ управления следует использовать для механизмов газо-воздушного тракта котла, индивидуальный частотный привод для питательных насосов, а классические способы регулирования для сетевых насосов станции. Даны практические рекомендации по внедрению группового регулирования частоты питающего напряжения электроприводов механизмов собственных нужд в условиях Харьковской ТЭЦ-3.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, системы собственных нужд, механизмы собственных нужд, групповое управление, групповое частотное регулирование, асинхронные двигатели, потребление электрической энергии на собственные нужды, математическое моделирование, распределительные устройства собственных нужд

Kruhol M.M. Energy efficiency improvement of thermal power plant auxiliary systems. Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.14.02 - power plants, networks and systems. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving a pressing scientific and engineering problem of improving energy efficiency of thermal power plant auxiliary systems through implementation of group frequency regulation for induction motors that drive auxiliary mechanisms.

The thesis presents a detailed analysis of auxiliary power consumption structure at thermal power plants. Approach to classification of auxiliary mechanisms has been advanced to take into account similarity of the operating modes and performance. Regulation methods for centrifugal mechanisms that are applied in Ukrainian thermal power plants have been analyzed, their advantages and disadvantages shown. Application of group control for auxiliary mechanisms with close optimal supply voltage frequencies has been suggested. Mathematical models of centrifugal mechanisms considered as load on electric drive have been developed. Optimal control parameter problems for auxiliary mechanisms have been formulated and solved under various techniques of the mechanism operation regulation. Auxiliary power consumption at a combined heat and power plant has been simulated for a typical summer month under the plant operation according to the heat schedule. Comparison of the simulation results with the actual auxiliary consumption data proved high accuracy of the developed mathematical models of the auxiliary mechanisms. Feasibility of group

control application to the auxiliaries in Kharkiv CHPP-3 has been studied. It is revealed that group control should be used for centrifugal mechanisms operating in the air-gas flow duct of the boiler, while feed pumps are best regulated by individual variable frequency drives and network pumps – by classical regulation techniques. Practical recommendations for implementation of group frequency regulation for auxiliary mechanism electric drives under operating conditions of Kharkiv CHPP-3 are given.

Key words: thermal power plants, auxiliary systems, auxiliary mechanisms, group control, group frequency regulation, induction motors, auxiliary power consumption, mathematical modeling, auxiliary switchgear

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and strokes, positioned centrally below the text.

Відповідальний за випуск
д. т. н., проф., вчений секретар НТУ «ХП»
Заковоротний О. Ю.

Підписано до друку 01.03.2021 р. Формат 60x84/16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 13/03/21.

Виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6
тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com