

Міністерство освіти і науки України
Національний гірничий університет

ПАПАЙКА Юрій Анатолійович

УДК 621.365.41:62-533.7

**РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
ПЕЧЕЙ ОПОРУ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем електропостачання Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: академік НАН України, доктор технічних наук, професор
Півняк Геннадій Григорович,
ректор, завідувач кафедри систем електропостачання
Інституту електроенергетики Національного гірничого
університету (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і
науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жежеленко Ігор Володимирович,
завідувач кафедри електрифікації промислових
підприємств Приазовського Державного технічного
університету (м. Маріуполь) Міністерства освіти і науки
України.

доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
проректор з наукової роботи, завідувач кафедри
електромеханіки Дніпродзержинського державного
технічного університету Міністерства освіти і науки
України.

Захист відбудеться ” ___ ” _____ 201_ р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному гірничому університеті (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розіслано ” ___ ” _____ 201_ р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
к.т.н., доцент

О.О. Азюковський

ПАПАЇКА Юрій Анатолійович

**РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
ПЕЧЕЙ ОПОРУ**

(Автореферат)

Підписано до друку 05.11.2010. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,0.

Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 120 прим. Зам. №

Національний гірничий університет
49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електропечі опору широко використовуються у машинобудівній та інших галузях економіки для різних операцій термообробки деталей. Зараз ті установки, що працюють на виробництві практично вичерпали свій ресурс та потребують негайної заміни. Подальша експлуатація таких печей призведе до збільшення питомих витрат та втрат електроенергії. Під час проектування та виготовлення сучасних електропечей підприємства-виробники впроваджують енерго- та ресурсозберігаючі технології для зменшення витрат та втрат енергії на нагрів. Це забезпечується, насамперед, застосуванням сучасних джерел живлення на базі керованих напівпровідникових елементів, які дозволяють формувати раціональні режими електроспоживання печей. У той же час недостатньо уваги приділяється питанням електромагнітної сумісності та якості електричної енергії при експлуатації електропечей опору нового покоління. Електромагнітні процеси, що протікають у системах електропостачання під час роботи печей опору, недостатньо вивчені та обґрунтовані. Проблема полягає в тому, що під час роботи електропечей виникають режими, при яких вони стають джерелами вищих гармонік та погіршується їх енергетична ефективність. Це необхідно враховувати при налагоджуванні засобів захисту та компенсації реактивної потужності.

Одним з варіантів вирішення проблеми є формування енергетично ефективних режимів електропечей під час будь-яких операцій нагріву. Але дотепер відсутні теоретично обґрунтовані положення щодо формування раціональних режимів електропечей. Ці приймачі електроенергії працюють з порівняно низькими енергетичними показниками.

Отже виникає необхідність проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на пошук енергетично ефективних режимів роботи електропечей з урахуванням параметрів та стану електричної мережі і іншого електротехнічного обладнання (трансформатори, електродвигуни, конденсаторні установки).

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у визначенні закономірностей протікання електромагнітних процесів в електропечах опору з тиристорними регуляторами напруги та обґрунтування вибору раціональних режимів електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення та її навантаження, що забезпечують зменшення втрат та споживання електроенергії. Задача є актуальною, оскільки її реалізація призводить до підвищення енергетичної ефективності електропечей та покращить окремі показники якості напруги.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дослідження за темою дисертації виконані відповідно планів науково-дослідних робіт Національного гірничого університету: «Оптимізація режимів роботи електротехнологічних установок» (№ держреєстрації 0106U001377).

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності електропечей опору та покращення якості

електричної енергії шляхом формування раціональних режимів нагріву. Для досягнення мети необхідно:

- дослідити параметри режиму електроспоживання печі опору у робочому діапазоні регулювання температури;
- створити математичну модель розрахунку коефіцієнтів несиметрії напруги для умов, що характерні для діючого виробництва, яка враховує параметри мережі та робочі режими електропечей опору;
- розробити підхід до забезпечення раціональних енергетичних показників електропечей та обґрунтувати способи їх отримання при різних комбінаціях режимних параметрів;
- розробити математичну модель для аналізу впливу параметрів електричного режиму електропечі на показники несинусоїдальності напруги та додаткові втрати потужності в електрообладнанні;
- розробити методіку симетрування напруги та визначення розрахункової потужності підприємства при урахуванні неповнофазних режимів електропечей опору;
- провести експериментальні дослідження, що підтверджують ефективність запропонованих режимів електроспоживання печей опору;
- розробити технічну схему системи керування режимами електроспоживання печей опору на основі застосування неповнофазних режимів нагріву.

Об'єкт досліджень – процеси споживання та перетворення електроенергії у системі «мережа живлення – тиристорний регулятор потужності – електропіч опору».

Предмет досліджень – показники енергетичної ефективності роботи електропечей опору, зв'язки цих показників з показниками режиму роботи установки та показники якості електроенергії.

Методи досліджень. Для розв'язання наукових завдань використано: метод перетворення Фур'є – для аналізу несинусоїдальних режимів; метод симетричних складових – для моделювання несиметричних режимів електропечей; елементи теорії ймовірності та математичної статистики – для обґрунтування процесів зміни електричного навантаження електропечей.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Інтегральні значення енергетичних коефіцієнтів тиристорного регулятора напруги при зміні потужності печі опору на інтервалі регулювання залежать від фазності живлення нагрівачів та часу роботи електропечі у трифазному та неповнофазних режимах. При цьому їх значення при несиметричних режимах значно вищі значень, сформованих при симетричному трифазному живленні нагрівачів.

2. Ефективність печі опору як пристрою симетрування напруги підвищується при наближенні середнього значення її потужності у неповнофазних режимах до середнього значення потужності нерозподіленого рівномірно однофазного навантаження, що зумовлює обґрунтування структури моделі для симетрування цехового навантаження при керуванні режимами електропечі, що живиться від керованого регулятора напруги.

Наукові результати дослідження:

1. Розроблена математична модель визначення енергетичних коефіцієнтів електропечей опору, що враховує, на відміну від відомих моделей, вплив кута керування тиристорами у діапазоні регулювання потужності, характерному для таких печей, та тривалість робочого циклу печі. Це дозволяє визначити раціональні параметри технологічного процесу нагріву та покращити техніко-економічні характеристики електропечі.

2. Вперше для досягнення максимальної енергетичної ефективності електропечей опору запропоновано використовувати неповнофазні режими живлення нагрівачів. Для цього обґрунтовані умови переходу установки у неповнофазні (двофазний або однофазний) режими, що засновані на виконанні умов балансу активної потужності у суміжних режимах.

3. Для оцінки впливу режимів роботи електропечей опору на електромагнітну сумісність обладнання запропонована математична модель розрахунку додаткових втрат активної потужності у цеховому обладнанні, що, на відміну від існуючих моделей, враховує місце розташування джерела електромагнітної перешкоди (електропечі) у системі електропостачання та режим тиристорного регулятора напруги.

4. Усунення несиметричних режимів роботи цехової електричної мережі можливе при рівності середньої активної потужності електропечі опору у спеціальних неповнофазних режимах та середньої потужності нерозподіленого рівномірно за фазами однофазного навантаження.

5. Енергоефективне пофазне керування процесом нагріву електропечі опору, на відміну від існуючого способу, здійснюється шляхом визначення найбільш завантаженої фази електричної мережі та прогнозуванні показників несиметрії напруги при застосуванні несиметричних режимів живлення нагрівачів.

Практичні результати дослідження:

1. Обґрунтовані умови визначення раціональних параметрів режиму електроспоживання електропечі опору з позиції енергетичних коефіцієнтів та електромагнітної сумісності обладнання.

2. Визначена послідовність дій для вибору найбільш завантаженої фази електричної мережі та доцільності застосування неповнофазних режимів живлення нагрівачів.

3. Розроблений та запатентований спосіб керування режимами електроспоживання нагрівальної установки (печі опору), що базується на формуванні неповнофазних режимів нагріву.

4. Визначені критерії оцінки енергетичної ефективності запропонованих режимів, а також кількісної оцінки показників якості напруги.

5. Розроблено методику визначення розрахункової потужності підприємства, що враховує тривалість роботи нагрівачів у симетричних та несиметричних режимах.

6. Обґрунтовані умови використання методики симетрування цехової електричної мережі при наявності навантаження з електропечей на підприємстві незалежно від фазності живлення установки.

7. Запропоновано технічну схему пристрою керування режимами нагріву електропечі опору, що відрізняється від існуючої схеми наявністю додаткових елементів, які забезпечують формування раціональних режимів електроспоживання.

8. Результати роботи у вигляді методики симетрування цехового навантаження впроваджено у ВАТ «Дніпроважмаш» та ВАТ «Дніпропетровський тепловозремонтний завод» при формуванні та аналізі режимів електропечей опору.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій зумовлена відповідністю припущень, прийнятих у математичних моделях, завданням моделювання та умовам експлуатації електропечей опору, вибором прийнятних методів моделювання електромагнітних процесів і підтверджується результатами співставлення теоретичних і експериментальних досліджень, де похибка розрахунку параметрів режиму не перевищує 10 %.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні матеріали і результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях: четверта міжнародна конференція «Обладнання та технології термічної обробки металів і сплавів» (м. Харків, 2003 р.); друга міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження в Україні: законодавство, теорія, практика» (м. Київ, 2004 р.); «Кадрове забезпечення та новітні технології у сфері енергозбереження гірничої та металургійної промисловості» (м. Дніпропетровськ, 2005 р.); «Проблеми сучасної електротехніки – 2006» (м. Київ, 2006 р.); X Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих» (м. Донецьк, 2010 р.); перша науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених НГУ «Наукова весна – 2010» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.).

Публікації. Основні положення й результати роботи опубліковано в 10 друкованих працях, з них 6 – статі у фахових виданнях, 1 – патент України, 1 – патент на корисну модель, 2 – матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Повний обсяг дисертації становить 197 сторінки друкованого тексту, до складу яких входять 178 сторінок основної частини, що складається зі вступу, 5 розділів і 6 висновків роботи; список використаних джерел з 89 найменувань на 9 сторінках, 4 додатків на 10 сторінках, 53 рисунків, 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано наукову задачу, визначено наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості щодо апробацій роботи і публікацій.

У **першому розділі** розглянуті особливості режимів електроспоживання електропечей опору. Проаналізовані системи керування тепловими режимами електропечей та їх вплив на електричну мережу підприємства.

Основні недоліки функціонуючих у промисловості електропечей опору – технічно та морально застарілі конструкції, позиційне регулювання температури. Експлуатація таких установок призводить до неефективного використання енергетичних ресурсів та погіршенню якості термообробки. Нагрівальні установки нового покоління з адаптованими регуляторами температури мають високі техніко-економічні показники. Однак існує невизначеність у впливі режимів роботи таких печей на електромагнітну сумісність, що погіршує ефективність функціонування системи електропостачання підприємства в цілому.

Вплив режимів роботи електропечей на показники якості напруги залежить від сукупності факторів, що не були досліджені досконально. Погіршення показників несинусоїдальності відбувається за рахунок застосування методу «форсування нагріву», коли номінальна потужність печі задіяна лише протягом перехідного процесу досягнення температури завдання. Тому забезпечення раціональних енергетичних режимів електропечей неможливе без урахування тривалості циклу нагріву та параметрів джерела живлення. Основою для формування раціональних режимів печей опору є застосування неповнофазних режимів живлення нагрівачів. При розробці комплексного підходу за умов регулювання режимами електропечей вказаним способом існує можливість одночасного підвищення енергетичних показників установки та покращення якості напруги за показниками несинусоїдальності та несиметрії.

Проаналізовані математичні моделі електропечей опору та їх систем керування, а також фундаментальні роботи з електромагнітної сумісності. Розглянуті наукові роботи Альтгаузена А.П., Арндарчука А.В., Борисова Б.П., Вагіна Г.Я, Шидловського А.К., Свенчанського А.Д., Маєвського О.А., Кузнецова В.Г., Солдаткіної Л.А., Іванова В.С., Соколова В.І., Півняка Г.Г., Жежеленка І.В., Саєнка Ю.Л., Железка Ю.С., Дрехслера Р., Budeanu С.І.

Аналіз показав, що існуючі моделі електричних режимів електропечей не задовольняють повною мірою вимогам електромагнітної сумісності сучасної системи електропостачання, оскільки не враховують режим роботи тиристорних джерел потужності та тривалість циклів термообробки. Зроблено висновки про необхідність розробки математичних моделей для формування раціональних режимів електропечей. Критеріями раціональності у роботі запропоновано використовувати енергетичні коефіцієнти Маєвського та показники несинусоїдальності та несиметрії напруги.

У **другому розділі** розроблено математичну модель розрахунку енергетичних показників електропечі при застосуванні несиметричних режимів живлення нагрівачів.

Математичну модель розроблено на основі рівняння складових повної потужності та отримання математичних залежностей, що описують характер зміни енергетичних коефіцієнтів при застосуванні неповнофазних режимів живлення. У результаті перетворень отримані рівняння миттєвих потужностей, де складові несиметричної потужності представлені у вигляді симетричних складових прямої, зворотної та нульової послідовності:

$$p_{L1} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_0 + \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] + u_{L1} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L1)v}, \quad (1)$$

$$p_{L2} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a \underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a^2 \underline{S}_0 + a^2 \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] + u_{L2} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L2)v}, \quad (2)$$

$$p_{L3} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a^2 \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a^2 \underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a \underline{S}_0 + a \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] + u_{L3} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L3)v}, \quad (3)$$

Представлений запис складових потужності дозволяє аналізувати енергетичні процеси при будь-яких несиметричних режимах живлення електропечей.

У електричних системах змінного струму для аналізу ефективності використання електричної енергії використовують енергетичні коефіцієнти. Враховуючи застосування у даній дисертаційній роботі неповнофазних режимів живлення електропечі ці коефіцієнти потужності, зсуву та викривлення визначаються наступним чином:

$$k_{im} = \frac{P_{i\phi}}{S_{i\phi}}; \quad k_{ic} = \sqrt{\frac{P_{i\phi}^2}{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2}}; \quad k_{iu} = \frac{\sqrt{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2}}{\sqrt{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2 + D_{i\phi}^2}} \quad (4)$$

де $i\phi$ – фазність живлення електропечі (3, 2, 1 фаза нагрівача).

При вирішенні поставленої наукової задачі необхідно обґрунтувати зв'язок енергетичних показників з активною потужністю печі за умов застосування спеціальних неповнофазних режимів. Для узагальнення отриманих результатів використаємо відносні одиниці активної потужності. Зони зміни енергетичних коефіцієнтів уперше запишемо у функції зміни активної потужності електропечі. Такий підхід відкриває можливості визначення зон ефективної роботи установки, а, отже, і формування раціональних режимів під час експлуатації електропечей. На рис. 1 наведена залежність енергетичних показників від кута керування тиристорами при трифазному симетричному режимі живлення нагрівачів. Рис. 2-4 розкривають залежність коефіцієнтів від активної потужності, що споживається піччю при несиметричних режимах живлення.

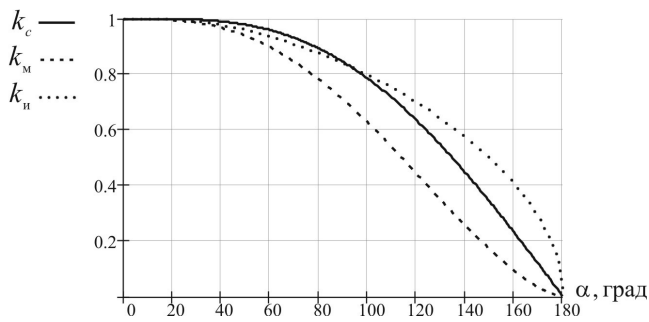


Рис. 1. Залежність енергетичних коефіцієнтів від кута керування тиристорами

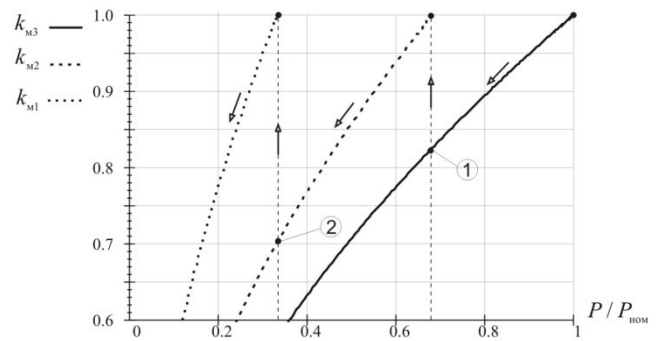


Рис. 2. Залежність коефіцієнта потужності від активної потужності печі при три-, дво- та однофазному живленні нагрівачів

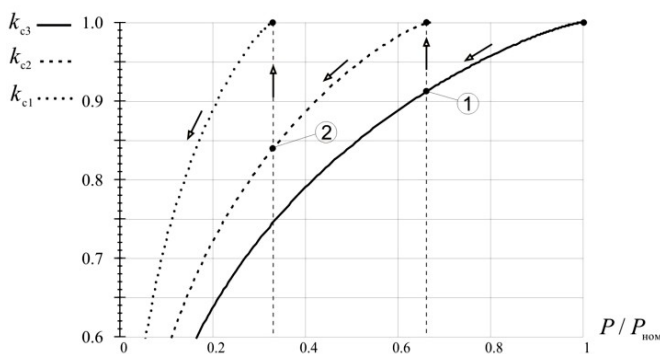


Рис. 3. Залежність коефіцієнта зсуву від активної потужності печі при три-, дво- та однофазному живленні нагрівачів

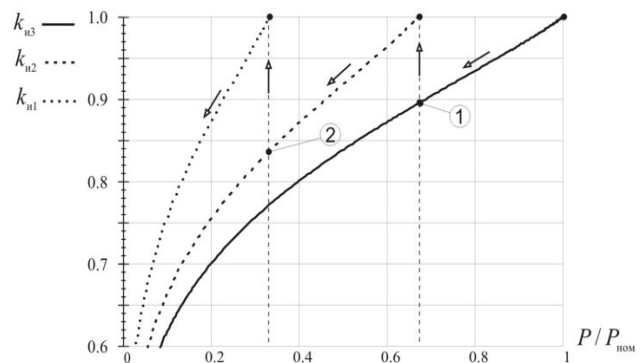


Рис. 4. Залежність коефіцієнта викривлення від активної потужності печі при три-, дво- та однофазному живленні нагрівачів

Одержані залежності доводять, що при трифазному живленні нагрівачів високі енергетичні показники забезпечуються при потужності, близькій до номінальної. При зниженні потужності коефіцієнти різко погіршуються.

Оскільки значення потужності електропечі змінюється протягом робочого циклу нагріву, то для аналізу енергетичних коефіцієнтів доцільно використовувати середні значення, отримані при урахуванні неповнофазних режимів роботи. На значення коефіцієнтів впливає тривалість циклу нагріву. Спираючись на отримані залежності енергетичних коефіцієнтів від потужності печі, розраховані середні значення цих коефіцієнтів при неповнофазних режимах живлення. Порівняльний аналіз виявив, що при зменшенні потужності, яку споживає електропіч з мережі, середні значення енергетичних коефіцієнтів значно вищі при неповнофазних режимах. Таким чином, доведена можливість забезпечення раціональних енергетичних режимів електропечей на всьому можливому діапазоні зміни робочої потужності.

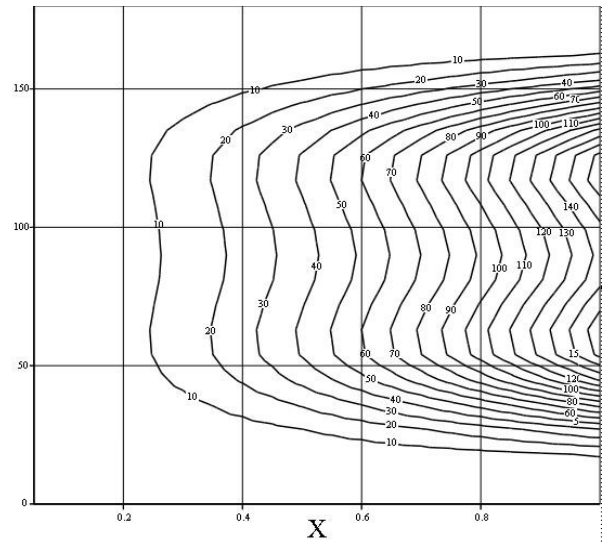
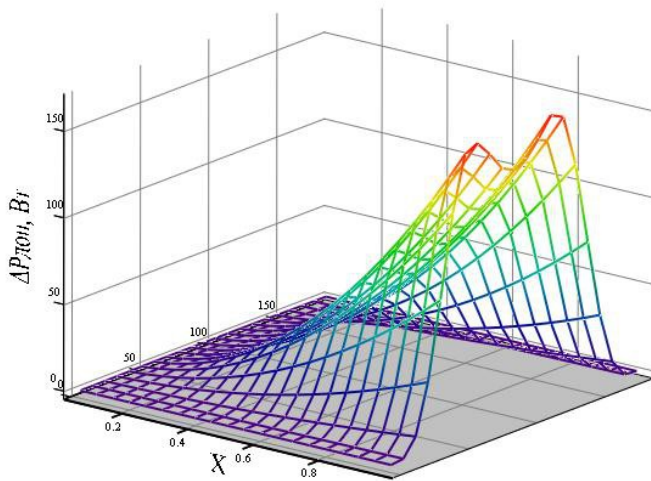


Рис. 5. Залежність додаткових втрат у асинхронному двигуні $P_{\text{номАД}} = 15 \text{ кВт}$ від кута керування тиристорами та точки підключення печі

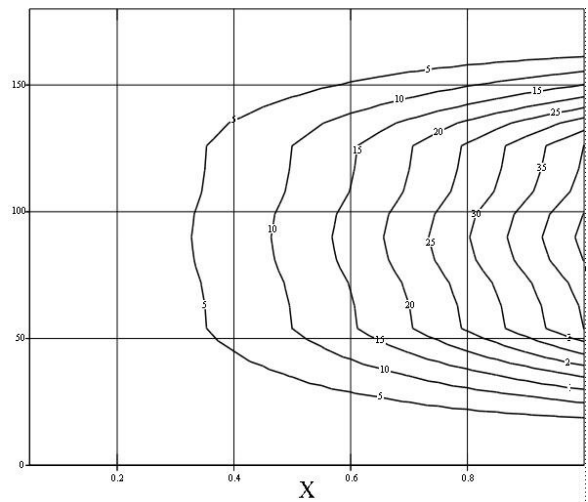
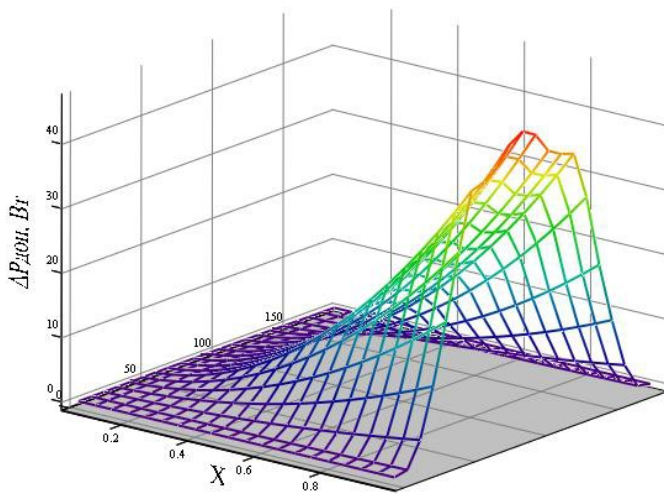


Рис. 6. Залежність додаткових втрат у конденсаторних установках $Q_{\text{номКУ}} = 50 \text{ квар}$ від кута керування тиристорами та точки підключення печі

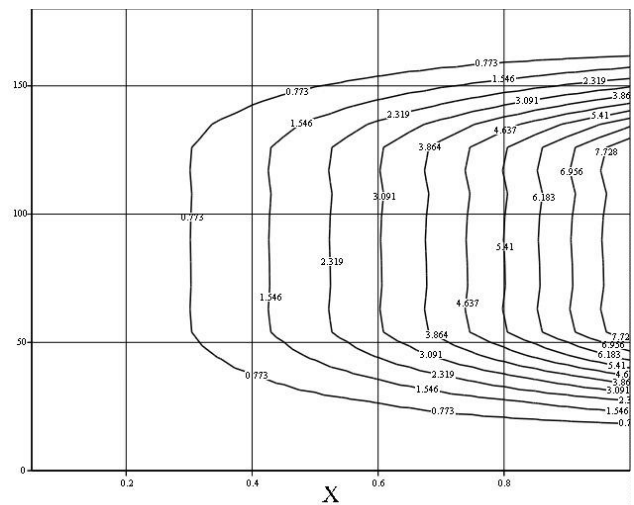
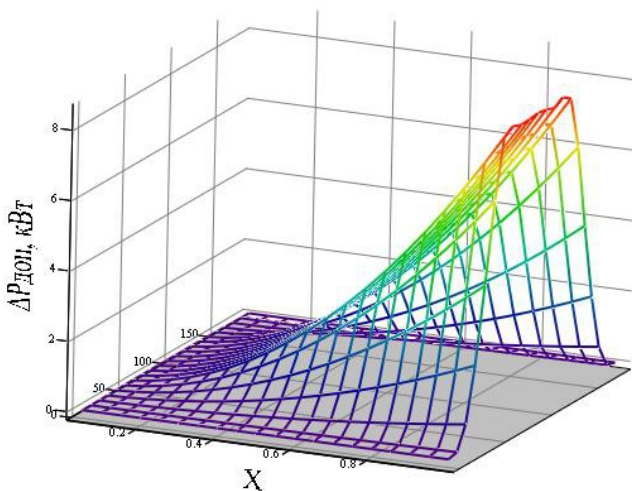


Рис. 7. Залежність додаткових втрат у трансформаторі $S_{\text{нт}} = 630 \text{ кВА}$ від кута керування тиристорами та точки підключення печі

Отримані залежності додаткових втрат активної потужності у цеховому електрообладнанні від режиму роботи тиристорного регулятора потужності та віддаленості електропечі від джерела живлення (рис. 5-7).

Дані залежності пропонується використовувати, як критерій оцінювання ефективності регулювання режимами електроспоживання печей опору.

У третьому розділі розроблено математичну модель визначення параметрів несиметрії напруги у цеховій розподільчій мережі. Модель відрізняється від існуючих можливістю передбачати поведінку трифазної чотирипроводної мережі при переведенні електропечі з повнофазного режиму на неповнофазний. При моделюванні застосовано метод симетричних складових. Структурну схему системи та схема заміщення наведено на рис. 8, 9. За джерело несиметрії при моделюванні враховуються лише несиметричні режими електропечі. Таким чином здійснюється оцінка несиметрії, створеної електропечю при застосуванні неповнофазних режимів.

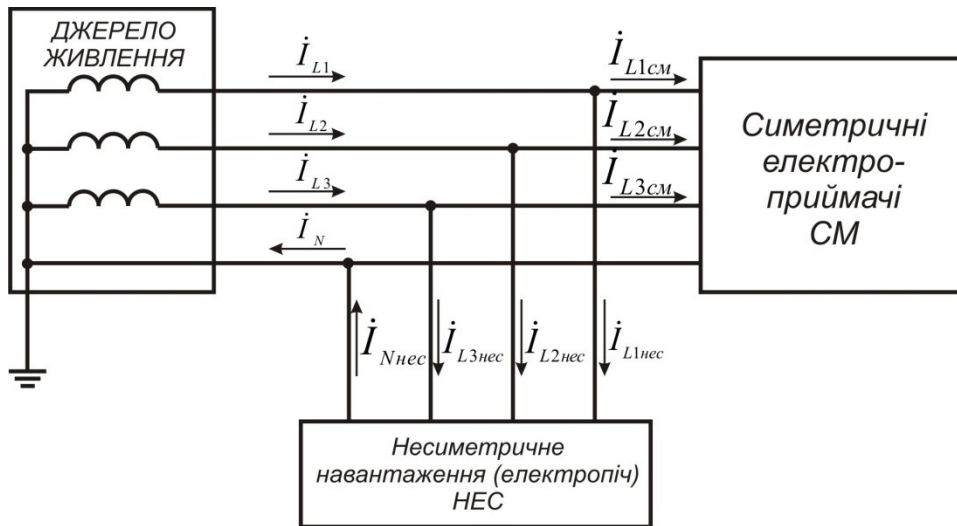


Рис. 8. Структура електричної мережі з несиметричним навантаженням

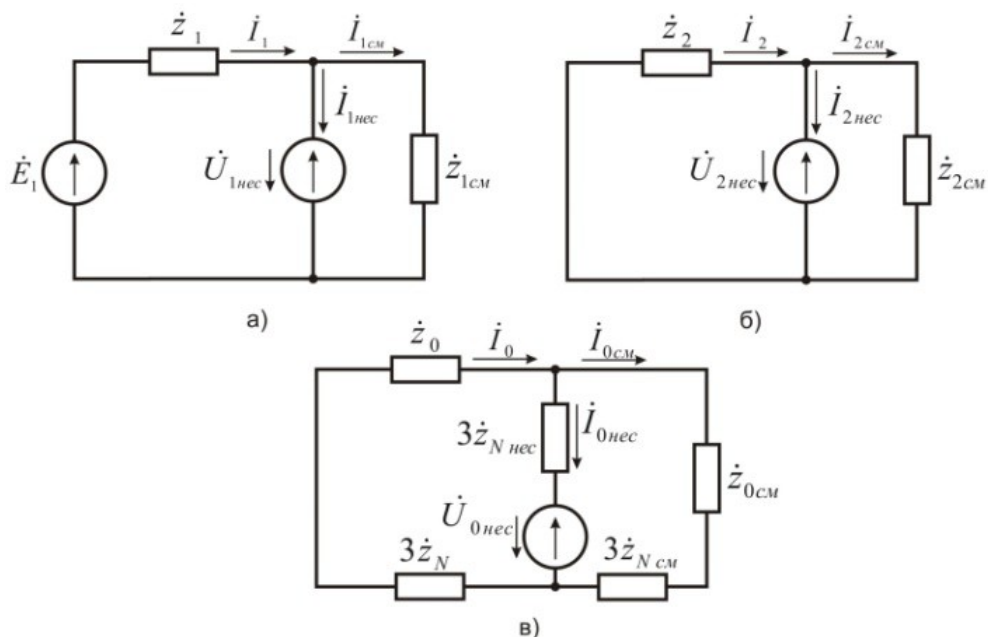


Рис. 9. Схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовності

Використовуючи схеми заміщення записані основні системи рівнянь для розрахунку несиметрії:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 z_1 + \dot{U}_{1\text{нес}} = \dot{E}_1; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{см}} + \dot{I}_{1\text{нес}}; \\ \dot{U}_{1\text{нес}} = \dot{I}_{1\text{см}} z_{1\text{см}}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_2 z_2 + \dot{U}_{2\text{нес}} = 0; \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\text{см}} + \dot{I}_{2\text{нес}}; \\ \dot{U}_{2\text{нес}} = \dot{I}_{2\text{см}} z_{2\text{см}}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_0 (z_0 + 3z_N) + \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = 0; \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_{0\text{см}} + \dot{I}_{0\text{нес}}; \\ \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = \dot{I}_{0\text{см}} (z_{0\text{см}} + 3z_{N\text{см}}). \end{cases} \quad (7)$$

Додаткові рівняння отримано при використанні векторної діаграми струмів та напруги (рис. 11). Діаграма побудована для схеми джерела несиметрії – зірка з нулем (рис. 10), оскільки така схема є характерною для промислових трифазних електропечей. У наведеній діаграмі прямими лініями наведено вектори струму двофазного режиму (вимкнена фаза $L1$), а пунктирними лініями вектори струму однофазного режиму (вимкнено фази $L1$ та $L2$).

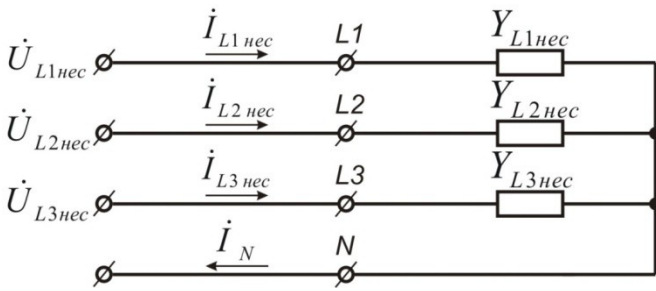


Рис. 10. Схема джерела несиметрії при з'єднанні провідностей у зірку з нулем

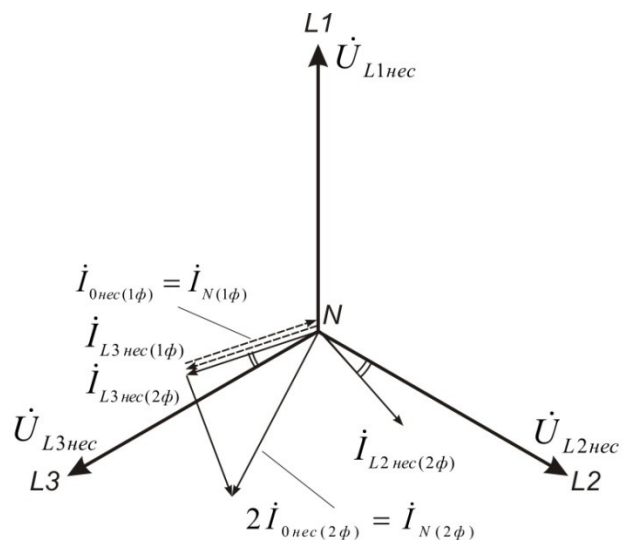


Рис. 11. Векторна діаграма струмів та напруг

Використовуючи модель розрахунку параметрів несиметрії були отримані регульовальні залежності при довільних комбінаціях потужності електропечей та мережі живлення $K_{U2} = f(S_{\text{ЭПС}}^*)$ (рис. 12).

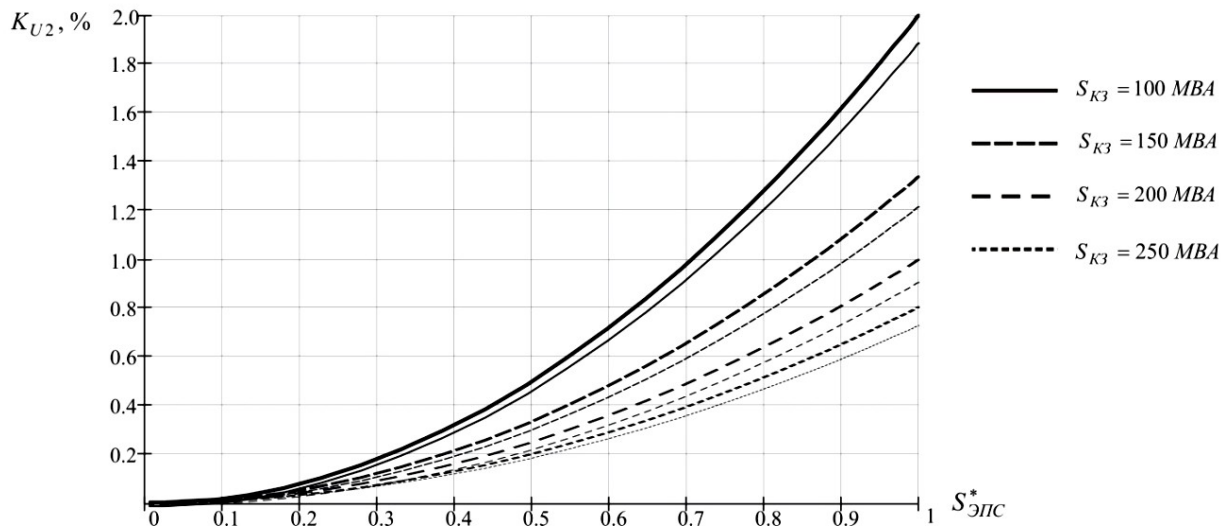


Рис. 12. Залежність коефіцієнта несиметрії зворотної послідовності від несиметричного навантаження при $S_{нт} = 400$ кВА

У четвертому розділі розроблено алгоритм керування режимами електроспоживання печей опору на основі застосування неповнофазних режимів живлення нагрівачів. Визначені режимні точки переходу системи з трифазного симетричного на неповнофазний режими. Умовою можливого переходу є виконання балансів активних потужностей у суміжних режимах. Наведені залежності потужності печі у трифазному та неповнофазних режимах від режимних параметрів тиристорного джерела живлення (рис. 13-14). Очевидно, що в результаті проведення технологічних операцій нагріву потужність електропечі змінюється у достатньо широких межах, тому для обґрунтування умов формування раціональних режимів споживання електроенергії даними установками необхідно визначити межі зміни середніх значень енергетичних коефіцієнтів. На основі математичних моделей розрахунку несиметричних режимів отримано залежності цих коефіцієнтів від тривалості циклу нагріву (рис. 15-16).

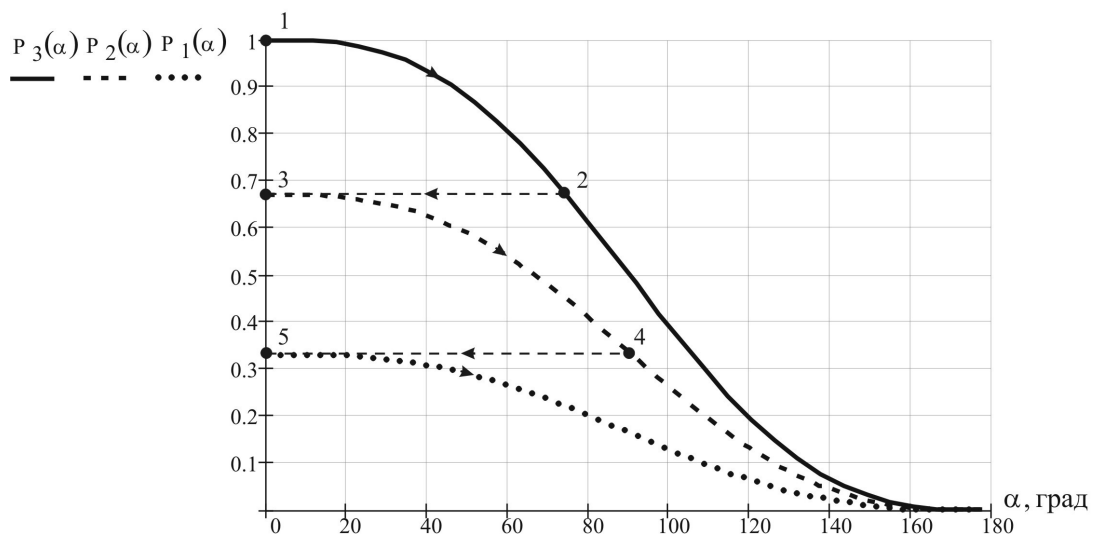


Рис. 13. Залежність потужності печі від кута керування тиристорами

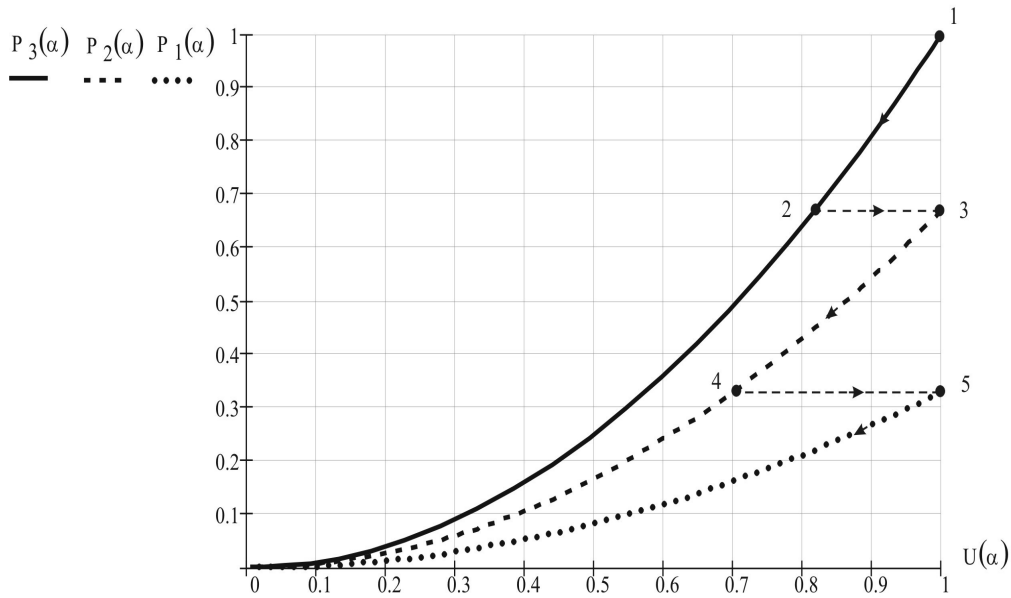


Рис. 14. Залежність потужності печі від напруги на нагрівачах

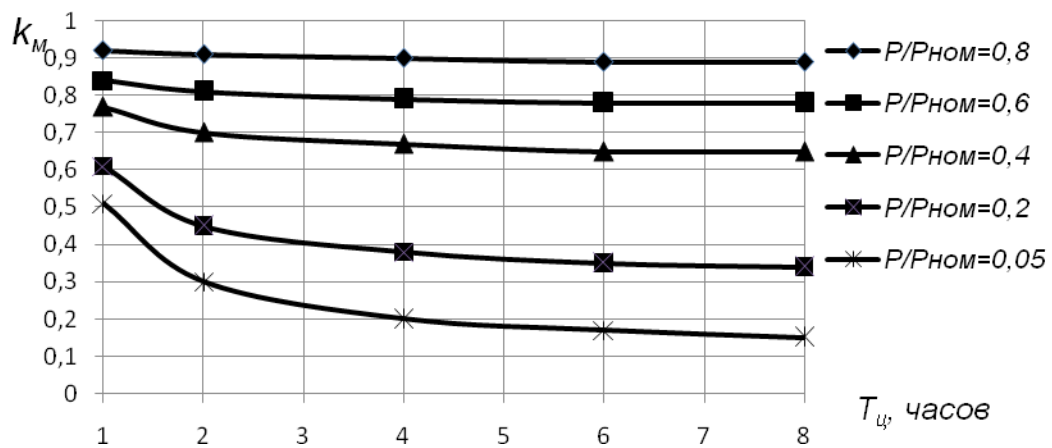


Рис. 15. Залежність середніх трифазних коефіцієнтів потужності від тривалості циклу нагріву електрпечі опору

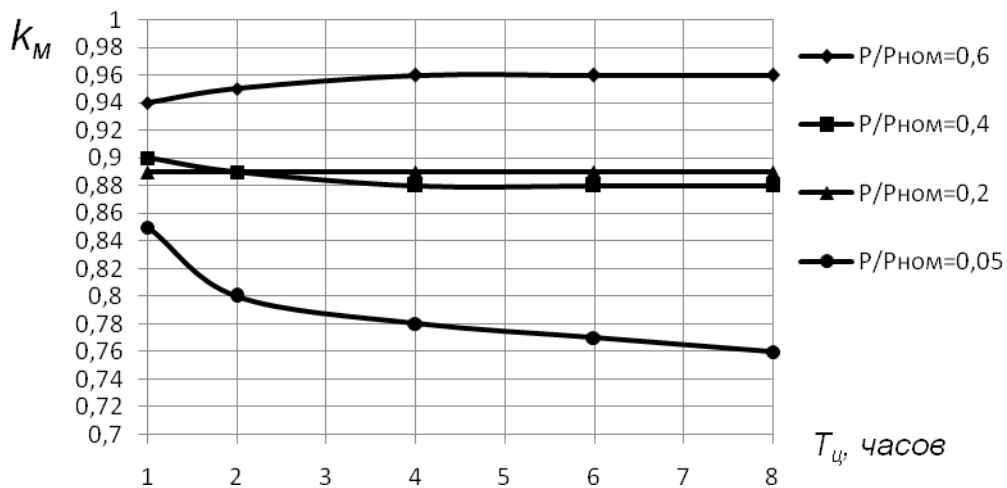


Рис. 15. Залежність середніх коефіцієнтів потужності від тривалості циклу нагріву електропечі опору у неповнофазних режимах

З отриманих залежностей видно, що при неповнофазних режимах живлення енергетичні показники значно вищі особливо при зниженні потужності, що споживає електропіч.

Розроблено схему керування режимами електроспоживання печі опору (рис.16). Відмінностями запропонованої схеми є додаткові елементи: блок заборони вмикання тиристорів вибраної фази Kt , що отримує сигнал від програмованого контролера ПЛК. Контролер у режимі реального часу визначає найбільш завантажену фазу електричної мережі та формує імпульс на заборону вмикання нагрівачів у цій фазі. Запропоновані зміни дозволять реалізувати систему керування електропечами опору для досягнення максимально ефективних режимів роботи, що враховує енергетичні показники та показники якості напруги.

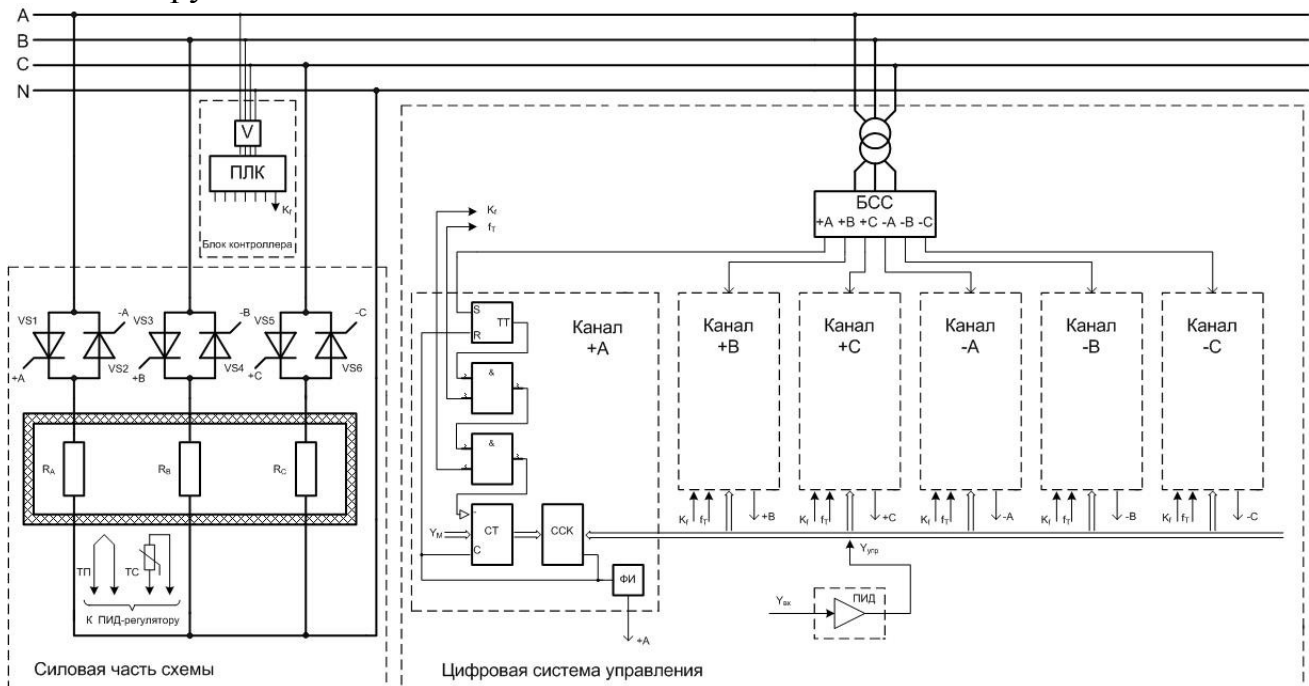


Рис. 16. Структурна схема керування режимами нагріву печі опору

У п'ятому розділі розглянуті питання практичної реалізації результатів дослідження. На основі отриманих результатів розроблена методика визначення потужності цехових трансформаторів та симетрування навантаження при застосуванні спеціальних неповнофазних режимів електропечей опору.

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечується за рахунок зниження електромагнітних збитків від неякісної напруги. Електропіч при цьому розглядається як симетруючий пристрій. Для умов системи електропостачання ВАТ «Дніпропетровський тепловозоремонтний завод» ефект складає 25 тис. у.о.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеною науково-дослідною роботою, наведено вирішення наукової задачі, яка полягає у встановленні взаємозв'язків формування режимів споживання енергії у системі електрична мережа – електропіч опору нового покоління та обґрунтуванні умов забезпечення раціональних параметрів і режимів роботи цієї системи. Сутність вирішення – у встановленні енергетично вигідних режимів роботи електропечей з точки зору електромагнітної сумісності, розробці алгоритму керування цими режимами в залежності від стану електричної мережі та її навантаження.

При вирішенні задачі отримані наступні результати:

1. В умовах постійного зростання вартості енергетичних ресурсів проблема зменшення питомої витрати електроенергії актуальна для усіх галузей економіки. Один з основних видів електрообладнання у машинобудівній промисловості – це електропечі опору. Втілення новітніх розробок при проектуванні та виготовленні електропечей – перспективний напрямок розвитку даного устаткування. Однак відомі на сьогодні дослідження не враховують вплив нового виду обладнання на електромагнітну сумісність системи електропостачання. Також не визначені для них критерії формування раціональних режимів електроспоживання. Відомі дотепер методи проектування систем електропостачання промислових підприємств не враховують наведені режимні особливості функціонування електропечей, тому в даній роботі розроблено комплексний підхід підвищення та оцінки енергетичних показників електропечей опору з тиристорним регулюванням, що заснований на формуванні аналітичних моделей енергетичних процесів у колі «мережа-перетворювач-електропіч».

2. Завдяки аналізу взаємозв'язку параметрів режиму електроспоживання печей опору та електричної мережі живлення підприємства визнана енергетична доцільність переведення нагрівачів печі з трифазного симетричного на неповнофазні режими живлення. Розроблена методика розрахунку енергетичних показників електропечей опору з тиристорним регулюванням при неповнофазних режимах живлення нагрівачів; особливістю розробленої методики є використання інтегральних значень енергетичних коефіцієнтів, отриманих при зміні часу нагріву печі та часу роботи у неповнофазних режимах.

3. Експериментально доведено, що використання спеціальних неповнофазних режимів живлення нагрівачів електропечей опору призводить до підвищення енергетичних показників у порівнянні з симетричним живленням. Встановлено, що при неповнофазних режимах коефіцієнт потужності підвищується до значень 0,85...0,76; коефіцієнт зсуву підвищується до значень 0,9...0,81; коефіцієнт викривлення – 0,907...0,835.

4. Теоретично та моделюванням доведено, що на відміну від традиційних електропечей з позиційним регулюванням температури, електропечі з тиристорними джерелами живлення є джерелами вищих гармонік струму та напруги. Їх негативний вплив на електрообладнання цеху носить змінний характер та залежить від сукупності режимних факторів. На основі дослідження впливу несиметричних та несинусоїдальних режимів напруги на

роботу приймачів електроенергії розроблена модель розрахунку додаткових втрат активної потужності в цеховому електрообладнанні (трансформаторах, асинхронних двигунах, компенсуючих пристроях) при несиметрії та несинусоїдальності живлячої напруги. На основі відпрацювання режимних співвідношень на математичній моделі, виявлено зони, де втрати потужності досягають максимальних значень. Вони відповідають кутам керування тиристорами 60 та 120° для асинхронних двигунів, 90° для конденсаторних установок, $50-130^\circ$ для трансформаторів. Режимми, що відповідають наведеним параметрам, рекомендується виключати при розробці алгоритму керування електропечами.

5. Застосування неповнофазних режимів живлення нагрівачів електропечей має ефект симетрування навантаження. Доведено, що несиметрія напруги в розподільчій мережі підприємства може бути повністю виключена при рівності середньої потужності електропечі та несиметричного навантаження. Таким чином, сформульовано комплексний підхід до симетрування напруги цехової мережі за допомогою трифазної електропечі з тиристорним регулятором потужності на основі застосування неповнофазних режимів живлення нагрівачів електропечі опору, що враховує тривалість циклів нагріву та співвідношення параметрів мережі живлення та навантаження.

6. Для створення пристрою керування режимами електроспоживання печей опору вперше запропоновано загальний підхід до формування неповнофазних режимів роботи печі опору, який заключається в почерговому вимиканні окремих фаз печі з урахуванням симетрування цехового навантаження. Встановлені допустимі межі зміни відношення найбільших та найменших навантажень, які забезпечують симетрування навантажень, що є основою вирішення практичних задач формування раціональних режимів.

7. Використання замість трифазних режимів живлення нагрівачів неповнофазних підвищує енергетичні показники печей опору та забезпечує електромагнітну сумісність обладнання. Для умов системи електропостачання ВАТ «Дніпропетровський тепловозоремонтний завод» економічний ефект, обумовлений зниженням збитку від несиметрії напруги склав 198 тис. грн. при застосуванні спеціальних режимів печі СНО-8.16.5/10.

Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:

1. Папаика Ю.А. К вопросу повышения энергетической эффективности электропечей сопротивления / Ю.А. Папаика // Технічна електродинаміка. – 2004. – №3. – С. 62-63.

2. Выпанасенко С.И., Папаика Ю.А. Оценка возможностей корректирования несимметричных режимов электросетей с печной нагрузкой / С.И. Выпанасенко, Ю.А. Папаика // Науковий вісник НГУ. – 2004. – №12. – С. 55-57.

3. Папаика Ю.А. Определение уровня дополнительных потерь в электрооборудовании промышленных предприятий при несимметрии и несинусоидальности напряжения / Ю.А. Папаика // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2005. – Вип.75. – С. 17-22.

4. Папаика Ю.А. Рациональные режимы электропотребления печей сопротивления с тиристорным регулированием / Ю.А. Папаика // Технічна електродинаміка. – Ч4. – 2006. – С. 87-89.

5. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Обоснование применения специальных режимов нагрева электропечей сопротивления для повышения качества электроэнергии в распределительных сетях промышленных предприятий / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2008. – Вип. 80. – С. 12-17.

6. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Анализ показателей графиков электрических нагрузок электропечей в несимметричных режимах / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2009. – Вип. 82. – С. 43-50.

7. Пат. України 82854, МПК G05D 23/19, H05B 3/00. Спосіб керування режимами електроспоживання нагрівальної установки / Півняк Г.Г., Випанасенко С.І., Папаїка Ю.А.; заявник та патентовласник Національний гірничий університет. - № а 2005 03663; заявл. 18.04.2005; опубл. 26.05.2008, Бюл.№10.

8. Деклараційний патент на корисну модель 11054, МПК H02M5/00. Спосіб керування режимами електроспоживання нагрівальної установки / Півняк Г.Г., Випанасенко С.І., Папаїка Ю.А.; заявник та патентовласник Національний гірничий університет. - № u 2005 04410; заявл. 11.05.2005; опубл. 15.12.2005, Бюл.№12.

9. Папаика Ю.А. Управление тепловыми режимами электропечей сопротивления с коррекцией несимметрии напряжения // Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих» (м. Донецьк, 2010 р.). – С. 98-101.

10. Папаика Ю.А. Неполнофазные режимы питания электропечей сопротивления // Матеріали першої науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених НГУ «Наукова весна – 2010» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.).

Особистий внесок автора. Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих в співавторстві полягає: робота [2] – постановка задачі та обґрунтування доцільності пофазного керування потужністю електропечі опору, робота [5] – аналіз впливу режимів роботи електропечі на додаткові втрати потужності, робота [6] – визначення коефіцієнтів графіків електричних навантажень при несимметричних режимах живлення електропечі, робота [7, 8] – алгоритм та структурна схема керування режимами електроспоживання печі опору.

АНОТАЦІЯ

Папаїка Ю.А. «Рациональні режими електроспоживання печей опору». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2010.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу, що полягає у встановленні закономірностей протікання електромагнітних процесів в електропечах опору з тиристорними регуляторами напруги та обґрунтування вибору раціональних режимів електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення на її навантаження, які забезпечують зменшення споживання електроенергії та підвищення енергетичної ефективності електропечей, покращують окремі показники електромагнітної сумісності обладнання.

Розроблена математична модель визначення енергетичних коефіцієнтів електропечей опору, що враховує, на відміну від відомих моделей, вплив кута керування тиристорами у діапазоні регулювання потужності, характерному для таких печей, та тривалість робочого циклу печі. Для досягнення максимальної енергетичної ефективності електропечей опору запропоновано використовувати неповнофазні режими живлення нагрівачів. Для цього обґрунтовані умови переходу установки у неповнофазний (двофазний або однофазний) режим, що засновані на виконанні умов балансу активної потужності у суміжних режимах. Для оцінки впливу режимів роботи електропечей опору на електромагнітну сумісність обладнання запропонована математична модель розрахунку додаткових втрат активної потужності у цеховому обладнанні, що враховує місце розташування джерела електромагнітної перешкоди (електропечі) у системі електропостачання та режим тиристорного регулятора напруги. Енергоефективне пофазне керування процесом нагріву електропечі опору на відміну від існуючого способу здійснюється шляхом визначення найбільш завантаженої фази електричної мережі та прогнозуванні показників несиметрії напруги при застосуванні несиметричних режимів живлення нагрівачів. Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

***Ключові слова:** електропечі опору, неповнофазні режими, енергетичні коефіцієнти, електромагнітна сумісність.*

АННОТАЦИЯ

Папайка Ю.А. «Рациональные режимы электропотребления печей сопротивления». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Национальный горный университет, Днепропетровск, 2010.

В диссертационной работе решена важная научная задача, которая заключается в установлении закономерностей протекания электромагнитных процессов во время работы электропечей сопротивления с тиристорными регуляторами напряжения и обоснование выбора рациональных режимов электропотребления с учетом состояния питающей сети. Это обеспечит

снижение потерь и потребления электроэнергии и повышение энергетической эффективности электропечей, улучшит отдельные показатели электромагнитной совместимости оборудования.

Разработана математическая модель определения энергетических коэффициентов электропечей сопротивления, которая учитывает, в отличие от известных моделей, влияние угла управления тиристорами в диапазоне регулирования мощности, характерном для таких печей. Для достижения максимальной энергетической эффективности электропечей сопротивления предложено использовать неполнофазные режимы питания нагревателей. Для этого обоснованы условия перехода установки в неполнофазный (двухфазный или однофазный) режим. Условие перехода - выполнение условий баланса активной мощности в смежных режимах. В результате анализа установлено, что средние значения энергетических коэффициентов в неполнофазных режимах повышаются при снижении мощности печи по сравнению с трехфазными режимами нагревателей.

Для оценки влияния режимов работы электропечей сопротивления на электромагнитную совместимость оборудования предложена математическая модель расчета дополнительных потерь активной мощности в цеховом оборудовании, которая учитывает место расположения источника электромагнитной помехи (электропечи) в системе электроснабжения и режим тиристорного регулятора напряжения. Отрабатывая все возможные реализации режимных параметров электропечей, были определены зоны работы, в которых наблюдаются максимальные дополнительные потери активной мощности в электрооборудовании (асинхронных двигателях, конденсаторных установках, цеховых трансформаторах) от несинусоидальности напряжения. Показано, что при эксплуатации электропечей существует возможность избегать этих режимов.

Использование неполнофазных режимов питания электропечей имеет эффект симметрирования напряжений, поскольку перераспределяется нагрузка сети по фазам. В отличие от существующих способов симметрирования такой подход является новым, поскольку известные мероприятия по симметрированию в основном предполагают установку специальных устройств, а при использовании предложенного способа, эффект симметрирования получен при управлении режимами электроприемника (трехфазной электропечи с тиристорным источником напряжения).

Получены регулировочные характеристики электропечи сопротивления, которые отражают зависимость коэффициентов несимметрии напряжения от соотношения мощностей печной несимметричной и трехфазной симметричной нагрузки. Кроме того учитывается мощность системы.

Разработан способ управления режимами электропотребления электропечи сопротивления на основе применения несимметричных режимов питания нагревателей.

Предложен алгоритм выбора рационального режима работы электропечи сопротивления, основанный на применении теоремы оптимальности по Паретто. При этом решениями в данном алгоритме являются три возможные

варианта питания нагревателей электропечи (трехфазный, двухфазный, однофазный). Оценками являются энергетические коэффициенты, коэффициенты несимметрии напряжения и дополнительные потери мощности в электрооборудовании. Такой подход позволяет сделать выбор режима электропечи при компромиссных решениях.

Энергоэффективное пофазное управление процессом нагрева электропечи сопротивления, в отличие от существующего способа, осуществляется путем определения наиболее загруженной фазы электрической сети и прогнозирования показателей несимметрии напряжения. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают достоверность полученных в работе научных результатов.

Ключевые слова: электропечи сопротивления, неполнофазные режимы, энергетические коэффициенты, электромагнитная совместимость.

SUMMARY

Рараика Yu.A. «Rational modes of electro-consumption of electric resistance furnaces». – Manuscript.

The thesis for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Mining University, Dnipropetrovsk, 2010.

It is known that electric resistance furnaces are 90 per cent of heat-treatment machinery of machine-building enterprises. Today tendency of new generation of electric furnaces use takes place to improve quality of heating operation. But together with advantages of modern electric furnaces with thyristor controllers this brings up the question if these electric installations have electromagnetic compatibility with mains as it may have negative influence on other workshop using equipment.

Mathematical model to compute parameters of voltage unbalance has been developed while studying unbalanced conditions of electrotechnical plants performance. Among other things it concerns electric resistance furnaces. The model is a system of equations on equivalent circuits of network taking into consideration technologic operating conditions of furnaces. Joint solution of the systems as for currents and voltages of positive sequence, reverse sequence and zero sequence helps to determine unbalance indices under any combination of mains-operated parameters and parameters of balanced load and unbalanced load.

To make qualitative assessment of balancing effect of single-phase energizing conditions for furnaces it is necessary to determine limits of variation of unbalance indices under different combinations of mains-operated parameters and load-voltage characteristics. That's why it is expedient to use the mathematical model for parameter synthesis of optimum relations between general shop load and furnace load to remove unbalance.

To generalize results obtained suppose that load within low voltage buses of workshop transformer is of balanced character, and furnace plant is a source of unbalance. Such an approach helps to determine unbalance falling at single-phase conditions of furnace.

Key words: *electric resistance furnaces, single-phase conditions, energy data rise, electromagnetic compatibility.*