

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Глибочко Іван Іванович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оцінка ненормованих показників якості електроенергії для визначення
величини струму нульового робочого провідника
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Глибочко І. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Рассадкіна Марина Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.ф-м.н., доцент кафедри вищої та

прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Глибочко І. І. Оцінка ненормованих показників якості електроенергії для визначення величини струму нульового робочого провідника

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Основною метою кваліфікаційної роботи є аналіз існуючих та розробка нових ненормованих показників якості електроенергії які визначають залежності величини струму нульового робочого провідника .

Основним завданням дослідження в даній роботі являється виявлення основних факторів, що впливають на зміну струму нульового робочого провідника в трифазній чотири провідній розподільчій системі електропостачання.

Ключові слова: система електропостачання, електричні мережі, якість електроенергії.

ABSTRACT

I. I. Hlybochko Evaluation of non-standard indicators of the quality of electricity for determining the value of the current of the zero working conductor

Qualifying work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2024.

The main goal of the qualification work is the analysis of the existing and the development of new non-normative indicators of the quality of electricity, which determine the dependence of the value of the current of the zero working conductor.

The main task of the research in this work is to identify the main factors that affect the change in the current of the zero working conductor in a three-phase four-wire power distribution system.

Key words: power supply system, power networks, power quality.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧОТИРЕХПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПІДПРИЄМСТВ	7
1.1 Характерні схеми електропостачання промислових об'єктів	7
1.2 Типи навантаження промислових підприємств	14
1.2.1 Несиметричне лінійне навантаження	15
1.2.2 Симетричне нелінійне навантаження	18
1.3 Несиметричне нелінійне навантаження	20
Висновки по розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. НЕНОРМОВАНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ВИЗНАЧАЮЧІ ВЕЛИЧИНУ СТРУМУ НУЛЬОВОГО РОБОЧОГО ПРОВІДНИКА	22
2.1 Ненормовані показники якості електроенергії	22
2.2 Аналіз даних навантаження медичного закладу	30
Висновки по розділу 2	36
РОЗДІЛ 3. ЗАЛЕЖНІСТЬ СТРУМУ В НУЛЬОВОМУ РОБОЧОГО ПРОВІДНИКА ВІД НЕНОРМОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	37
3.1 Вплив нелінійною навантаження на величину струму в нульовому робочому провіднику	37
3.2 Вплив несиметричного навантаження на величину струму в нульовому робочому провіднику	39
3.3 Взаємодія показників несиметрії та несинусоїдальності на струм нульового робочого провідника	40
Висновки по розділу 3	42
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

ВСТУП

В електротехнічних комплексах підприємств останнім часом все частіше та частіше впроваджуються потужні електроспоживачі, які вносять значні порушення в напруги та струми системи електропостачання. Незважаючи на це для якісної роботи подібного обладнання необхідно напруга, повністю задовольняюче міжнародним стандартам якості електроенергії. У зв'язку з цим виникає ситуація взаємовплив роботи обладнання і якості електричної енергії. Крім того в трифазних чотири провідних електричних мережах несиметричні і нелінійні споживачі призводять до збільшення навантаження на нульовий робітник. Найбільше вплив це надає на експлуатовані мережі, до яким підключається знову введена в роботу нелінійна навантаження. Це часто призводить до аварійних ситуацій, що викликають припинення електропостачання, перекіс фаз по напруги і навіть пожежі.

У даний час державними стандартами нормуються тільки коефіцієнти несинусоїдальності та не симетрії (для основної гармоніки) по напруги, які, на жаль, не враховують можливість виникнення струму в нульовому робочому провіднику.

У ДСТУ 3466-96 єдиним розширенням параметрів нульового робочого провідника є збільшення допустимого перерізу нульового робочого провідника [1]. Однак для існуючих підприємств заміна нульового робочого провідника на новий з великим перетином може бути пов'язана з великими матеріальними витратами і технологічними складнощами, пов'язаними з його прокладкою по старим кабельним трасам.

У зв'язку зі всім вищесказаним щодо струму нульового робочого провідника виникла нова ситуація, пов'язана з його перетином, нелінійністю і не симетрією навантаження і іншими факторами, надають вплив на величину струму в нульовому робочому провіднику. Для любого підприємства все це приводить до питання о необхідності рішення комплексного завдання зниження струму нульового робочого провідника в залежності від різних

факторів, які надають вплив з його величину.

Основним завданням дослідження в даній роботі являється виявлення основних факторів, що впливають на зміну струму нульового робочого провідника в трифазній чотири провідній розподільчій системі електропостачання.

Виходячи з вище сказаного **метою роботи** є аналіз існуючих та розробка нових ненормованих показників якості електроенергії які визначають залежності величини струму нульового робочого провідника .

Предметом дослідження є струм у нульовому робочому провіднику та його варіативність.

Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи теорії електричних ланцюгів та електропостачання, математичного моделювання електричних ланцюгів, комп'ютерного моделювання з використанням програмних продуктів MATLAB.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Ярош Я.Д., Глибочко І. І. ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОЮ ТА НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВЕЛИЧИНУ СТРУМУ В НУЛЬОВОМУ РОБОЧОМУ ПРОВІДНИКУ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

Ярош Я.Д., Глибочко І. І. ВЗАЄМОДІЯ ПОКАЗНИКІВ НЕСИМЕТРІЇ ТА НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НА СТРУМ НУЛЬОВОГО РОБОЧОГО ПРОВІДНИКА

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

Глибочко І. І. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА ВВЕДЕННЯ В

ЕКСПЛУАТАЦІЮ ОБ'ЄКТІВ МАЛОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧОТИРЕХПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Характерні схеми електропостачання промислових об'єктів

Для конкретизації мети, завдань та об'єкта дослідження у роботі проведено аналіз конфігурації та режимів роботи розподільчої мережі підприємств різних галузей.

У ході дослідження були розглянуті схеми електропостачання підприємств різних галузей промисловості: нафтовий (переробне підприємство), металургійної (сталеплавильний завод), целюлозно-паперовий промисловості, соціальних об'єктів, а також їх основні енергоспоживачі і їх режими роботи на зазначених об'єктах.

Слід відзначити, що для всіх типів підприємств характерно наявність однофазного навантаження, розподіленого несиметрично по живлячим фазам.

Оскільки об'єкти нафтової промисловості пов'язані в першу чергу з перекачуванням нафти та нафтопродуктів, то на них основним навантаженням є синхронні і асинхронні двигуни з частотним регулюванням [6, 7].

На насосних станціях магістральних нафтопроводів, що перекачують, і компресорних станціях проектна потужність електроспоживачів як правило складає 40 - 60 МВт, але може перевищувати і 100 МВт.

На рисунку 1.1 в якості прикладу представлений варіант схеми електропостачання нафтопромислу [8]. З аналізу схеми можна дійти невтішного висновку, що на знижуючих підстанціях використовуються трансформатори широкого діапазону напруг, починаючи від високої напруги 110/35 кВ і закінчуючи трансформаторами 6/0,23, які служать для освітлення, і 6/0,4 кВ, призначеними для живлення електрообладнання насосних свердловин. Сумарна потужність трансформаторів може досягати десятків МВА.

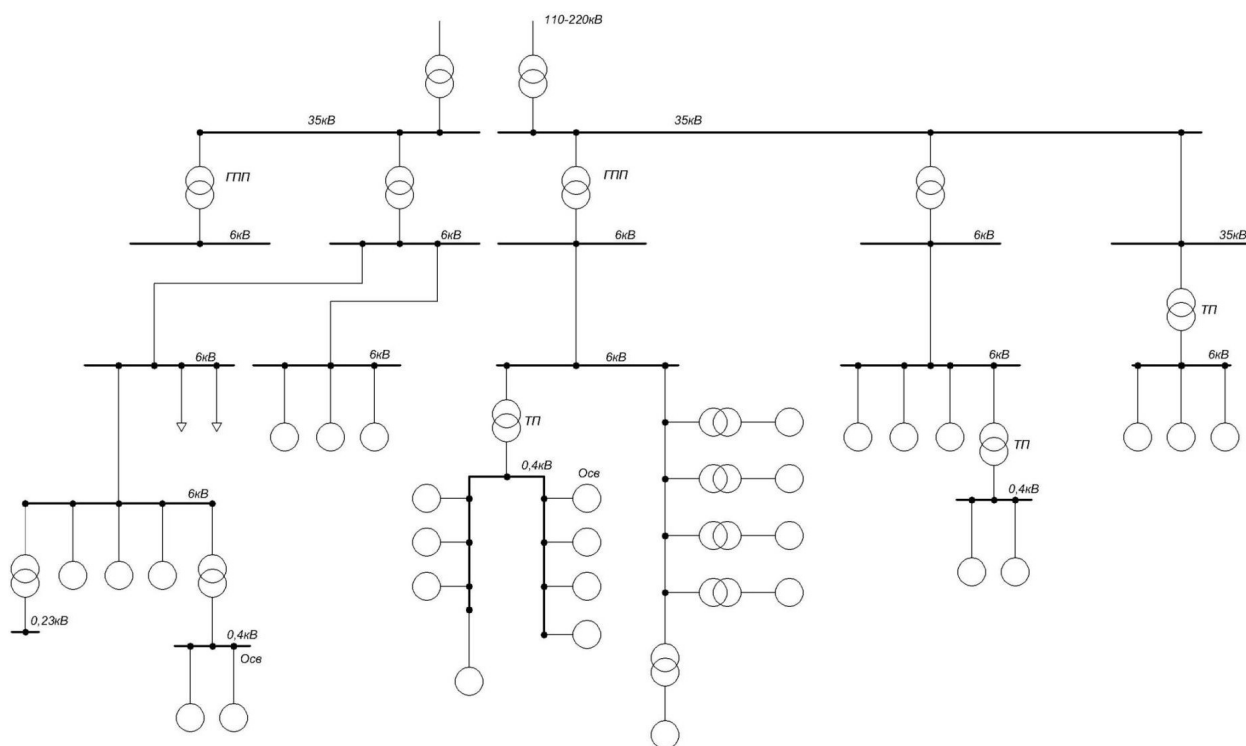


Рисунок 1.1 – Варіант схеми електропостачання об'єктів нафтових промислів: ГПП – головна знижуюча підстанція; ТП - трансформаторна підстанція

Від однієї трансформаторної підстанції може відходити не один десяток живлячих ліній з перетином від 70 до 150 мм² (найбільш поширені перерізи).

Крім того аналіз режимів роботи і складу обладнання розподільчих електричних мереж об'єктів нафтової промисловості показав, що крім навантаження, яке живиться від джерел високої напруги, існує також велика частка низьковольтного навантаження (до 1000 В), яке живиться від трифазної чотирипровідної розподільчої мережі з нульовим робочим провідником.

Оскільки основну частку низьковольтного навантаження складають електроприводи з частотним регулюванням, то в подібних розподільчих системах очевидна наявність несинусоїдальних фазних струмів.

На рисунку 1.2 наведено схема електропостачання нафтопереробного підприємства.

З аналізу режимів роботи і складу навантаження електричних розподільних систем сучасних нафтопереробних заводів (НПЗ) виявлено, що проектні потужності насосів і компресорів можуть лежати в широкому

діапазоні потужностей – від 0,4 до 12 000 кВт. Окрім насосів на НПЗ широко поширені електродвигуни напругою 0,38 кВ потужністю до 200 кВт - вони складають до 50% всієї навантаження НПЗ. Режим роботи обладнання нафтопереробного заводу в здебільшого тривалий, добовий графік навантаження практично незмінний. Найбільш поширені перерізу мідного дроти – від 50 до 120 мм².

Живлення енергоспоживачів в низьковольтній частині розподільчою мережі підприємства виконується по трифазній чотирипровідній системі з нульовим робочим провідником.

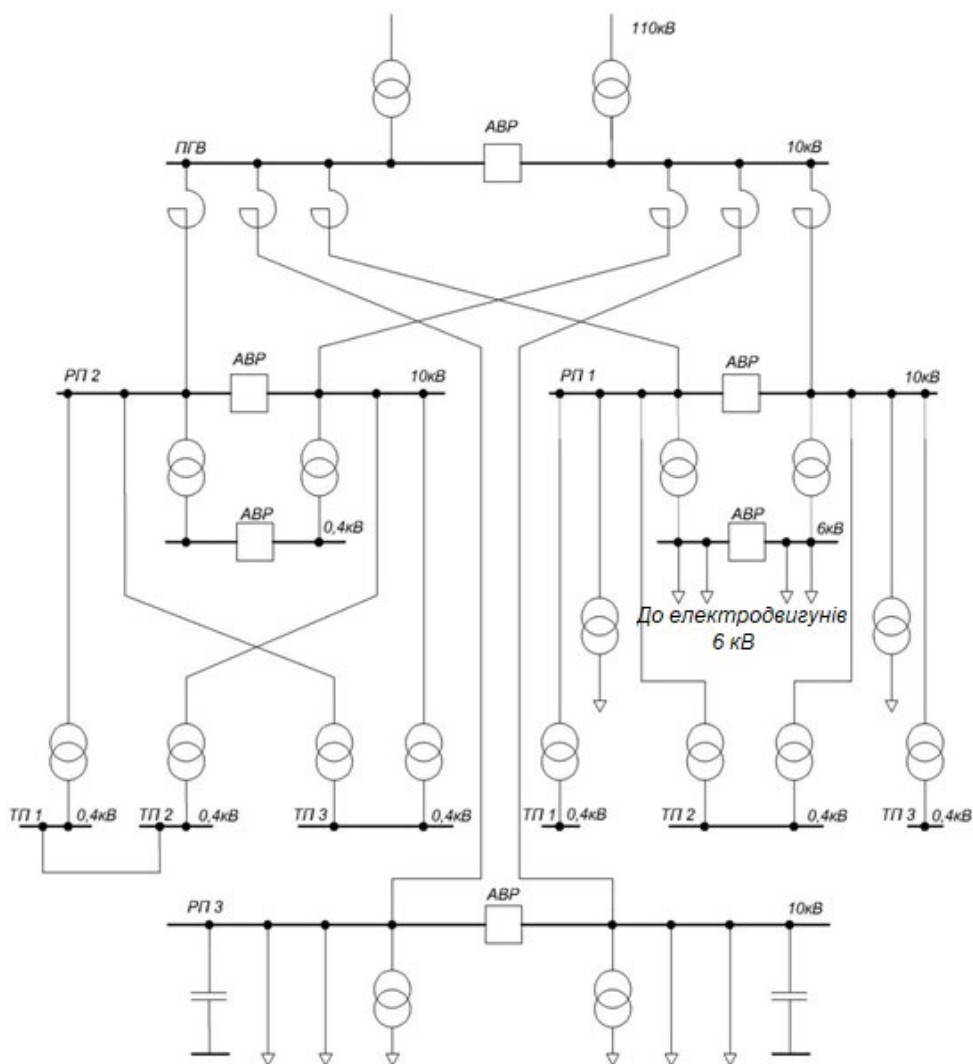


Рисунок 1.2 - Схема електропостачання нафтопереробного підприємства

На рисунку 1.3 наведено схему електропостачання металургійного комбінату.

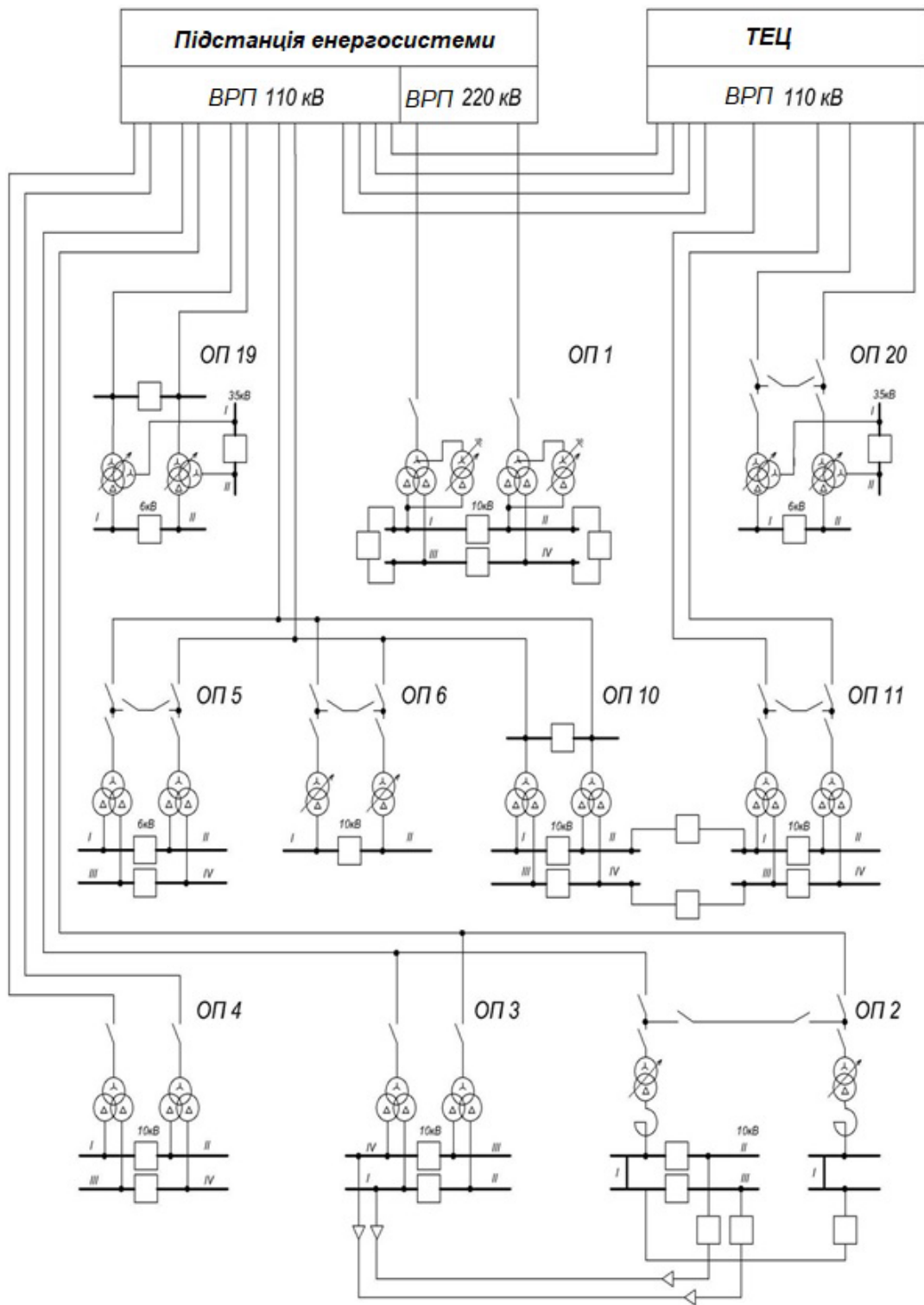


Рисунок 1.3 - Схема електропостачання металургійного комбінату

З аналізу режимів роботи і складу навантаження електричних розподільчих систем металургійних комбінатів з повним циклом виявлено, що в їхньому складі присутні потужні нелінійні та несиметричні споживачі з різко змінним характером навантаження. У зв'язку з цим призначені для живлення освітлення трансформаторні підстанції 10(6)/0,4 кВ, чутливі до змін

показників якості електроенергії підключаються до секції шин 10(6) кВ, не призначених для живлення різко змінного навантаження. Найбільш поширені перерізи кабельних ліній з мідними та алюмінієвими проводами до 150 мм².

Найбільш потужними енергоспоживачами на металургійних комбінатах є дугові сталеплавильні печі, які можуть мати потужність від 25 до 50 МВА. Також в літературі наведено приклади печей з пічними трансформаторами потужністю до 80 МВА [9].

Один з варіантів схеми електропостачання дугових сталеплавильних печей наведено на рисунку 1.4.

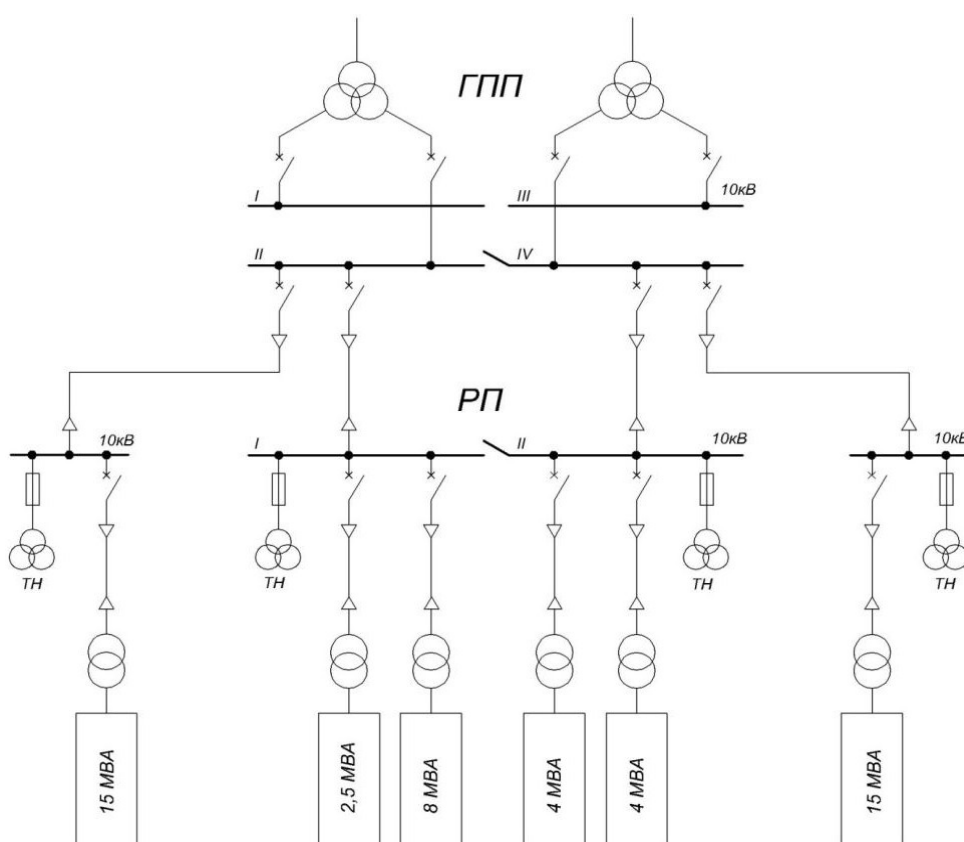


Рисунок 1.4 - Схема електропостачання дугових сталеплавильних печей

З аналізу режимів роботи і складу навантаження електричних розподільчих систем підприємств хімічної промисловості виявлено, що основним навантаженням є відцентрові насоси, поршневі і турбокомпресори потужністю до 15 000 кВт [10]. Їх режим роботи переважно тривалий, проте є електроприводи, характер навантаження яких короточасний. У здебільшого це характерно для центрифуг, які мають циклічний режим роботи та важкі

умови пуску, після якого навантаження на мережі знижується в 2-3 рази. На підприємствах гумової промисловості найбільшого поширення набула різко змінне циклічне навантаження з тривалістю циклу від 20 до 40 хвилин [11].

На рисунку 1.5 наведено схема електропостачання целюлозно-паперового комбінату.

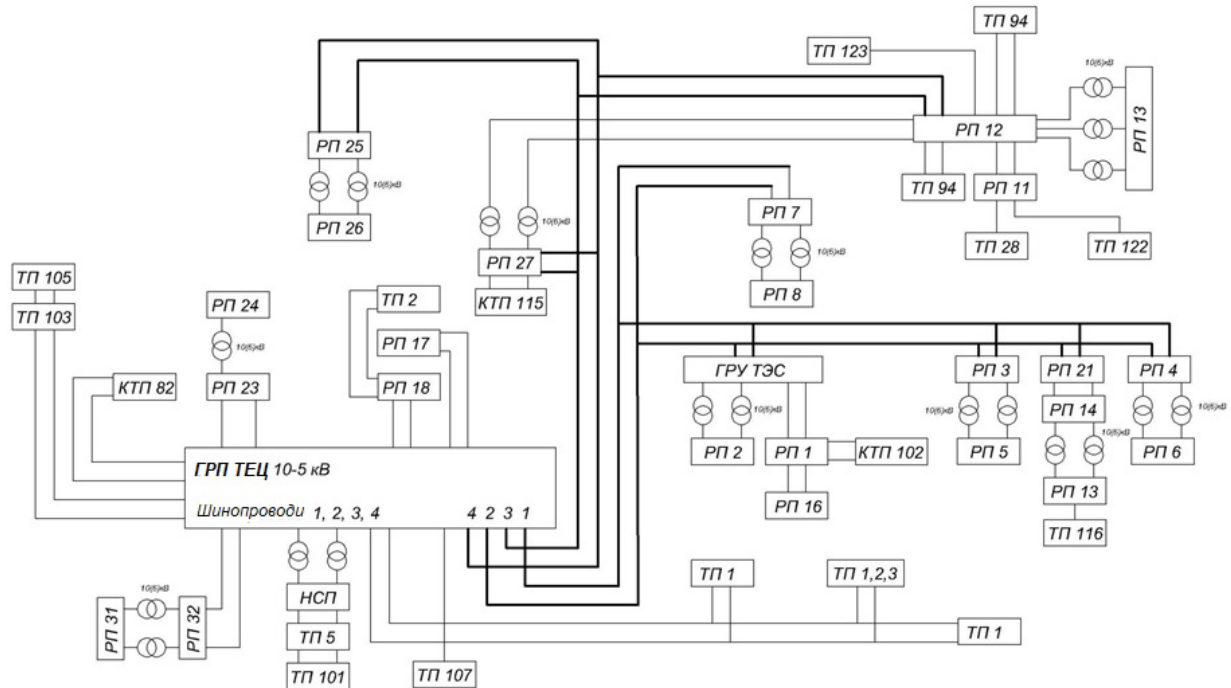


Рисунок 1.5 - Схема зовнішнього електропостачання целюлозно-паперового заводу

На підприємствах целюлозно-паперовий промисловості потужності електроприводів можуть лежати в межах до 9000 кВт, причому більша частина навантаження працює в тривалому режимі. Також стоїть відзначити, що електроприймачі потужністю до 250 кВт переважно запитані від трифазних чотирипровідних мереж напругою 0.38 кВ. Найбільш поширені кабельні лінії з перетином проводу від 70 до 150 мм².

Для підприємств легкої промисловості найбільш характерні електроспоживачі потужністю до 200 кВт із тривалим режимом роботи і коефіцієнтом попиту від 80 до 90%.

У таблиці 1.1 представлені [12] статистичні дані про складі

електроприймачів на підприємствах різних галузей промисловості З аналізу таблиці можна зробити висновок про те, що низьковольтне навантаження (до 1 кВ) промислових підприємств має такий самий, а то й більший обсяг порівняно з високовольтним навантаженням (6-10 кВ), та нехтувати ним при розрахунку внесених спотворень не слід.

У таблиці 1.1 представлені [12] статистичні дані про складі електроприймачів на підприємствах різних галузей промисловості З аналізу таблиці можна зробити висновок про те, що низьковольтне навантаження (до 1 кВ) промислових підприємств має такий самий, а то й більший обсяг порівняно з високовольтним навантаженням (6-10 кВ), та нехтувати ним при розрахунку внесених спотворень не слід.

Таблиця 1.1 - Склад електроприймачів на підприємствах різних галузей промисловості, %

Підприємства	Синхронні двигуни 6-10 кВ	Асинхронні двигуни		Освітлення	Печі дугові	Печі	Печі опору	Випрямлячі	Інше навантаження
		6-10 кВ	380 В						
Металургійні	25	10	37	3	4	7	3	11	-
Гірничорудні	21	21	47	5	-	-	-	-	6
Хімічні	40	24	29	2	-	2	1	2	-
Легка промисловість	-	6	78	12	-	-	-	-	10
Машинобудування	8	5	52	5	7	6	14	3	-
Нафтопереробка	8	48	30	5	-	-	-	-	9
Газові	40	58	-	2	-	-	-	-	-
Нафтодобувні	26	18	50	2	-	-	-	-	-

На невиробничих об'єктах (житлові будинки, офіси, установи освіти, медичні установи тощо) основними енергоспоживачами є освітлювальні і побутові прилади, комп'ютерної техніки.

Крім малопотужних приймачів в установах може використовуватися спеціалізоване обладнання:

1. Технічне - верстати, електродвигуни, стенди по перетворювальній

техніці та силовій електроніці та ін. – у середньоспеціальних та вищих навчальних закладах;

2. Медичне - комп'ютерні і магніто-резонансні томографи, рентген та ін – у медичних установах;

3. Нагрівальне – потужні електроплити та ін. кухонне обладнання – на підприємствах харчової промисловості і харчоблоків медичних і освітніх установ.

У складі електричної мережі медичного об'єкта широко представлені освітлювальні прилади, комп'ютерна техніка (у т.ч. власний сервер), малопотужні медичні пристрої. Також представлені рухові навантаження (ліфтове обладнання, вентиляція), холодильні та нагрівальні установки (харчовий блок, морг, дезінфекційні камери), а також потужні трифазні споживачі (Рентген - 150 КВт, комп'ютерні томографи - 25÷50 КВт, магніторезонансний томограф із допоміжним обладнанням – (100+50) КВт).

Для живлення навантажень використовуються мідні і алюмінієві чотирьох- і п'яти провідні кабелі перетином до 150 мм².

З вищенаведеного аналізу систем електропостачання підприємств різних галузей промисловості можна зробити висновок про те, що будь-яке підприємство має в складі свого електротехнічного комплексу низьковольтну трифазну чотирипровідну електричну розподільчу мережу, в якій представлена як нелінійне, так і несиметричне навантаження.

Оскільки найбільш яскраво вираженим діапазоном несиметрії і несинусоїдальності навантажень має трифазна чотирипровідна електрична мережа соціального об'єкта, то прийнято рішення проводити дослідження на його основі, а потім отримані експериментальні і теоретичні результати узагальнити з метою можливості їх поширення на будь-які промислові та соціальні об'єкти.

1.2 Типи навантаження промислових підприємств

Для низьковольтних мереж промислових підприємств основними типами навантаження є [13-33]:

1. Симетричне лінійне навантаження;
2. Несиметричне лінійне навантаження;
3. Симетричне нелінійне навантаження;
4. Несиметричне нелінійне навантаження.

При цьому кожен з цих типів навантаження надає свій вплив на значення струму нульового робочого провідника.

1.2.1 Несиметричне лінійне навантаження

Симетричне лінійне навантаження – найкращий тип навантаження будь-якого промислового підприємства.

Режим роботи підприємства з симетричною лінійною навантаженням неодноразово описаний у всіх підручниках електротехніки та електропостачання [33- 36]. Суть його полягає в тому, що в нульовому робочому провіднику за такого режиму роботи струм не протікає, оскільки за першим законом Кірхгофа в спільній точці фазні струми повністю скорочуються.

Поздовжня несиметрія - це несиметрія, яка виникає в трифазний електричної мережі через несиметрію її елементів, тоді як поперечна несиметрія – це несиметрія, що виникає через підключення до трифазної електричної мережі нерівномірних навантажень.

У зв'язку зі всім вищесказаним можна зробити наступний висновок, що основними причинами виникнення несиметрії як струмів, так і напруг є:

1. Нерівномірний розподіл навантажень в фазах;
2. Неповнофазна робота лінії або інших елементів у трифазній розподільчій мережі;
3. Неоднакові параметри лінії в фазах мережі.

При симетричній системі напруг і несиметричному навантаженню, коли $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ та $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$ струми в фазах споживача різні і визначаються по закону Ома (1.1)

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / Z_a ; \dot{I}_b = \dot{U}_b / Z_b ; \dot{I}_c = \dot{U}_c / Z_c . \quad (1.1)$$

Струм в нульовому робочому провіднику $\dot{I}_0$ дорівнює геометричній сумі фазних струмів

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (1.2)$$

Згідно ДСТУ 32144-2013 [40] «Несиметрія трифазний системи напруг обумовлена несиметричними навантаженнями споживачів електричної енергії або несиметрією елементів електричної мережі».

Показниками якості електроенергії (ЯЕ), що належать до несиметрії напруг в трифазних системах, є коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності k_{2U} і напруг по нульовий послідовності k_{0U}

Для зазначених показників ЯЕ встановлені наступні норми:

- «значення коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною послідовністю k_{2U} і несиметрії напруг за нульовою послідовністю k_{0U} у точці передачі електричної енергії, усереднені в інтервалі часу 10 хв, не повинні перевищувати 2 % протягом 95 % часу інтервалу в один тиждень»;

- «значення коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною послідовністю k_{2U} і несиметрії напруг за нульовою послідовністю k_{0U} у точці передачі електричної енергії, усереднені в інтервалі часу 10 хв, не повинні перевищувати 4 % протягом 100 % часу інтервалу за один тиждень».

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності визначається за формулою

$$k_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

де $U_{2(1)}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;

$U_{1(1)}$ - діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Допускається обчислювати k_{2U} за виразом,

$$k_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном.мф}} \cdot 100, \% \quad (1.4)$$

де $U_{номмф}$ - номінальне значення міжфазної напруги мережі, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю дорівнює

$$k_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% \quad (1.5)$$

де $U_{0(1)}$ - діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруги, В.

Допускається обчислювати k_{0U} за формулою,

$$k_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{ном.мф}} \cdot 100, \% \quad (1.6)$$

де $U_{номф.}$ - номінальне значення фазної напруги, В.

Коефіцієнти несиметрії струмів визначаються аналогічно.

В [41] показано, що несиметрія може призводити до наступних негативних наслідків для електричної мережі промислового підприємства:

1. Додаткові втрати електроенергії;
2. Збільшення витрат на модернізацію електричної розподільної мережі підприємства;
3. Збитки, що виникають через простой обладнання при виникненні аварійних ситуацій, пов'язаних з пошкодженням та обривом фазних та нульового робочого провідників;
4. Збільшення споживаної двигунами та конденсаторними блоками реактивної потужності.

Крім того, в [42-47] був проведений аналіз наслідків, що виникають через несиметрію напруг.

Наприклад, несиметрія напруг величиною 5% призводить до зниження потужності асинхронних двигунів на величину від 5 до 20% від номінальної, а термін його служби скорочується більш ніж удвічі. Також встановлено, що "1% величини коефіцієнта несиметрії напруг відповідає 1,73% додаткового відхилення напруги" [48].

Несиметрія струмів, крім впливу на нульовий робочий провідник, також впливає на низькочастотні канали автоматики, провідного зв'язку та сигналізації [49].

1.2.2 Симетричне нелінійне навантаження

В даний час у зв'язку з широким розповсюдженням напівпровідникових перетворювальних приладів практично неможливо зустріти електричну мережу, яка живить лише лінійне навантаження. У зв'язку з цим розглянемо режим роботи електричної мережі з симетричним несинусоїдальним навантаженням.

У 3-х фазній симетричній електричній мережі струми фаз А, В і С як правило зрушені на 120° відносно один одного та їх сума, що зумовлює величину струму нульового робочого провідника, дорівнює нулю. Однак це не стосується струмів гармонік, кратних трьом:

$$n = 3(2k + 1) \text{ , де } k = 0, 1, 2, \dots \quad (1.7)$$

Вищі гармоніки струмів, кратні трьом, збігаються по фазі, а отже, складаються в нульовому робочому провіднику, тим самим зумовлюючи нульову послідовність струмів:

$$\begin{aligned} i_{A(3)} &= I_{Am} \sin(3 \cdot \omega t), \quad i_{B(3)} = I_{Bm} \sin(3 \cdot \omega t + 240), \quad i_{C(3)} = I_{Cm} \sin(3 \cdot \omega t + 120); \\ i_{A(3)} &= I_{Am} \sin(3 \cdot \omega t), \quad i_{B(3)} = I_{Bm} \sin(3 \cdot \omega t + 720), \quad i_{C(3)} = I_{Cm} \sin(3 \cdot \omega t + 360); \\ I_N &= I_A + I_B + I_C = i_{A(3)} + i_{B(3)} + i_{C(3)} = (I_{Am} + I_{Bm} + I_{Cm}) \sin(3 \cdot \omega t). \end{aligned} \quad (1.8)$$

У зв'язку з цим можлива ситуація, що при великій частці струмів гармонік кратних трьох у складі фазних струмів значення струму нульового робочого провідника може перевищувати фазні струми [52]. Припустимо, частка третій гармоніки у складі фазних струмів становить 35%. Тоді значення струму нульового робочого провідника становитиме 105% від фазного струму.

З усього вищесказаного можна зробити такий висновок:

За наявності струмів гармонік, кратних трьох, у складі фазних струмів можливе перевищення струмом нульового робочого провідника значень фазних струмів, що ставить питання можливості збільшення його перерізу, як правило складового від 50 до 100% перерізу фазного провідника в трифазних чотирипровідних розподільчих електричних мережах. Крім того, високі значення струму нульового робочого провідника можуть призвести до втрати в ньому напруги, що у свою чергу призведе до несиметрії фазної напруги та

спотворення їх форми.

Також варто відзначити, що коефіцієнт несинусоїдності фаз струму не нормується.

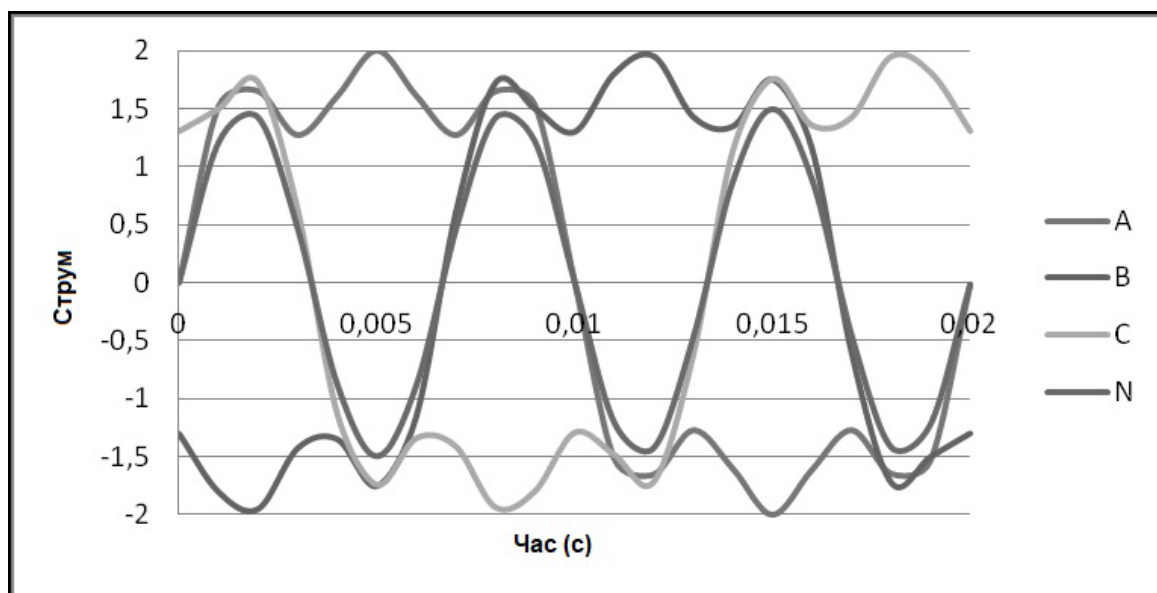


Рисунок 1.6 - Осцилограма фазних струмів та струму нульового робочого провідника симетричного нелінійного навантаження

На рисунку 1.6 показано часову діаграму фазних струмів і струму нульового робочого провідника при симетричному нелінійному навантаженні.

З аналізу графіка 1.6 виявлено, що значення струму, що діють, склали: для фази А - 1.5 від. од., для фази В - 1.5 від. од., для фази С - 1.5 від. од., а нульовому робочому провіднику склали 1.03 від. од., коефіцієнт несинусоїдності фазних струмів - 35%, частка 3-ї гармоніки - 23.6%, струм нульового робочого провідника на 100% складається з струму гармонік, кратних трьом.

Цим додатково ілюструється припущення про те, що при роботі симетричної несинусоїдальної навантаження струм у нульовому робочому провіднику може перевищувати фазні струми, складається при цьому тільки струмів гармонік, кратних трьом.

З усього сказаного вище висновок про те, що при живленні симетричного несинусоїдального навантаження при перевищенні 33.3% частки вищих гармонік, кратних трьом, у складі фазних струмів, струм нульового робочого провідника може значно перевищувати фазні струми.

1.3 Несиметричне нелінійне навантаження

Нині серед сучасних промислових підприємств та побутових споживачів найбільшого поширення набуло нелінійне несиметричне навантаження, що ставить питання необхідності розгляду її режимів роботи.

Для розглянутого типу навантаження струм нульового робочого провідника міститиме у своєму складі дві основні складові:

1. Обумовлену наявністю несиметрії фазного навантаження;
2. Зумовлену несинусоїдністю фазного навантаження.

Крім того, у складі струму нульового робочого провідника крім струмів гармонік, кратних трьом, будуть також присутні струми та інших гармонік, в т.ч. першої, обумовлені несиметрією фазних струмів, що ставить питання необхідності спільного обліку як несиметрії, і несинусоїдності фазних навантажень.

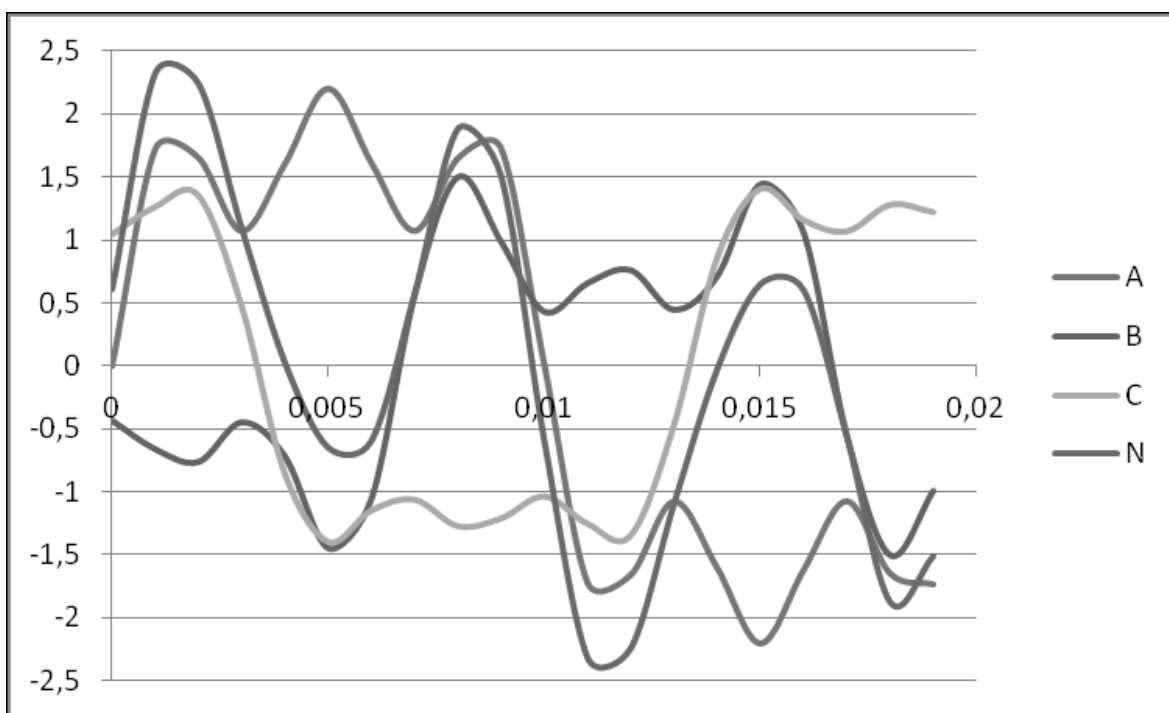


Рисунок 1.7 – Тимчасова діаграма фазних струмів та струму нульового робочого провідника несиметричного несинусоїдального навантаження

На рисунку 1.7 часова діаграма фазних струмів та струму нульового робочого провідника для несиметричного нелінійного навантаження.

Для розглянутого прикладу коефіцієнт несинусоїдності фазних струмів склав: фаза А – 43%, фаза – 86%, фаза С – 39%. Коефіцієнт несиметрії за

нульовою послідовністю – 19%. Чинні значення струмів: для фази А - 1.54 від. од., для фази – 0.93 від. од., для фази З – 1.14 від. од., для нульового робочого N – 1.37 від. од.. Коефіцієнт несинусоїдності струму нульового робочого провідника – 198%, частка струмів гармонік, кратних трьох – 76.4%, основної гармоніки – 20,3%, 5-ї гармоніки – 3.3%.

Висновки по першому розділу

Проведений аналіз режимів роботи та складу навантаження промислових підприємств та інших енергоспоживачів показав, що при роботі нелінійного несиметричного навантаження струм у нульовому робочому провіднику може значно перевищувати значення струму під час роботи аналогічного за величиною несиметричного лінійного та симетричного нелінійного навантаження.

У наведеному прикладі струм у нульовому робочому провіднику при роботі нелінійного несиметричного навантаження перевищив у 1.33 рази та 2.28 рази відповідно струми при роботі симетричного нелінійного та несиметричного лінійного навантаження.

Звідси, підтверджуючи, що несиметрія, як і несинусоїдність призводять до збільшення струму нульового робочого провідника.

РОЗДІЛ 2

НЕНОРМОВАНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ВИЗНАЧАЮЧІ ВЕЛИЧИНУ СТРУМУ НУЛЬОВОГО РОБОЧОГО ПРОВІДНИКА

2.1 Ненормовані показники якості електроенергії

У розглянутих раніше розділах виявлено, що струм у нульовому робочому провіднику може перевищувати допустимі значення при несиметрії нелінійних фазних навантажень, які представлені в широкому спектрі видів і потужностей як на промислових, так і на цивільних підприємствах.

Згідно з ДСТУ 32144-2013 нормованими показниками для несиметричними режимами роботи є:

1. Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю;
2. Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності.

Для несинусоїдальних режимів роботи характерні:

1. Коефіцієнти гармонійних складових напруги до 40-го порядку $K_{U(n)}$;
2. Сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги K_U .

Однак нормовані показники якості електроенергії за напругою не дозволяють оцінити можливість визначення величини струму в нульовому робочому провіднику, оскільки мережі з ідеальною синусоїдою напругою та нелінійними несиметричними струмами широко поширені, що ілюструється даними, отриманими в ході експериментального дослідження на медичному об'єкті, наведеними на малюнках 2.1.-2. 2.

При використанні загальноприйнятих коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності струму виникають такі проблеми:

1. Сумарний коефіцієнт гармонійних складових (СКГС) струму нульового робочого провідника може набувати значення, що дорівнює нескінченності, оскільки, за відсутності струму основної гармоніки у складі струму нульового робочого провідника, знаменник виразу (2.1) набуває значення 0, що ілюструється графіком на рисунку 2.3.

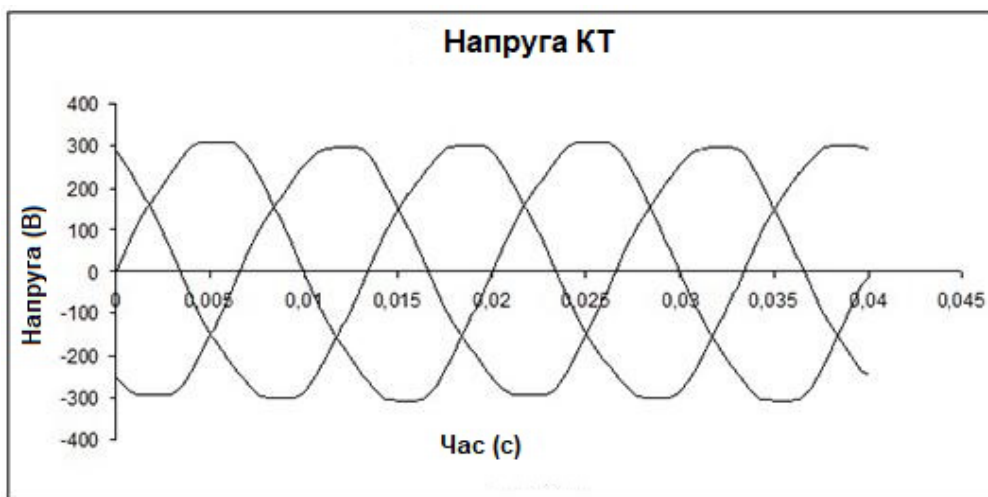


Рисунок 2.1 - Крива фазних напруг комп'ютерного томографа

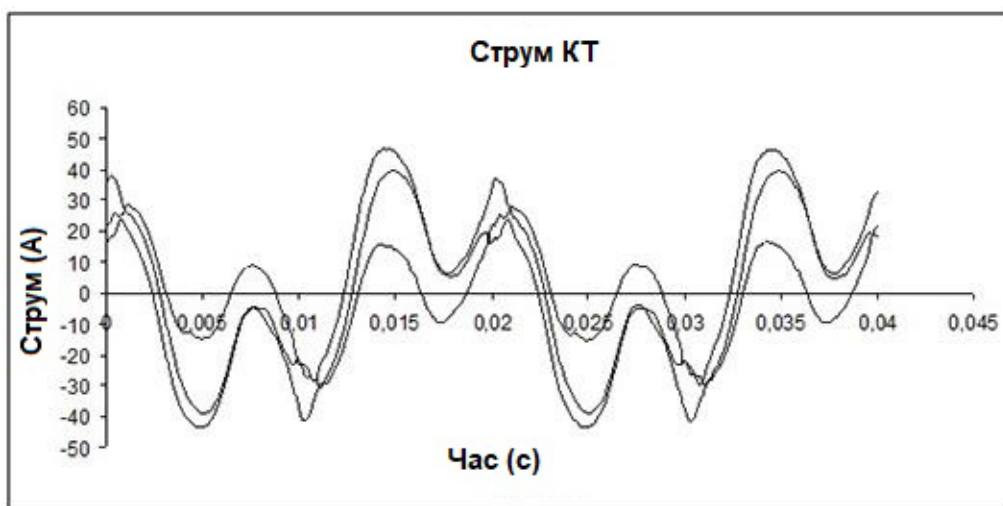


Рисунок 2.2 – Крива фазних струмів комп'ютерного томографа

$$СКГС = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (2.1)$$

де n – номер гармонічної складової, I_n – струм гармонійної складової, I_1 – струм першої (основної) гармонійної складової.

Залежності на рисунку 2.3 побудовані при зменшенні несиметричних складових струму нульового робочого провідника при незмінних струмах гармонік, кратних 3. З аналізу що за винятком основної гармонійної складової струму нульового робочого провідника СКГС набуває значення, що дорівнює нескінченності, тоді як струм нульового робочого провідника продовжує змінювати своє значення. Звідси випливає, що застосовувати його для оцінки

складу струму нульового робочого провідника неприпустимо і необхідно шукати нові, ненормовані коефіцієнти якості електроенергії, які дозволяють оцінити склад струму нульового робочого провідника без математичних невизначеностей різних типів.

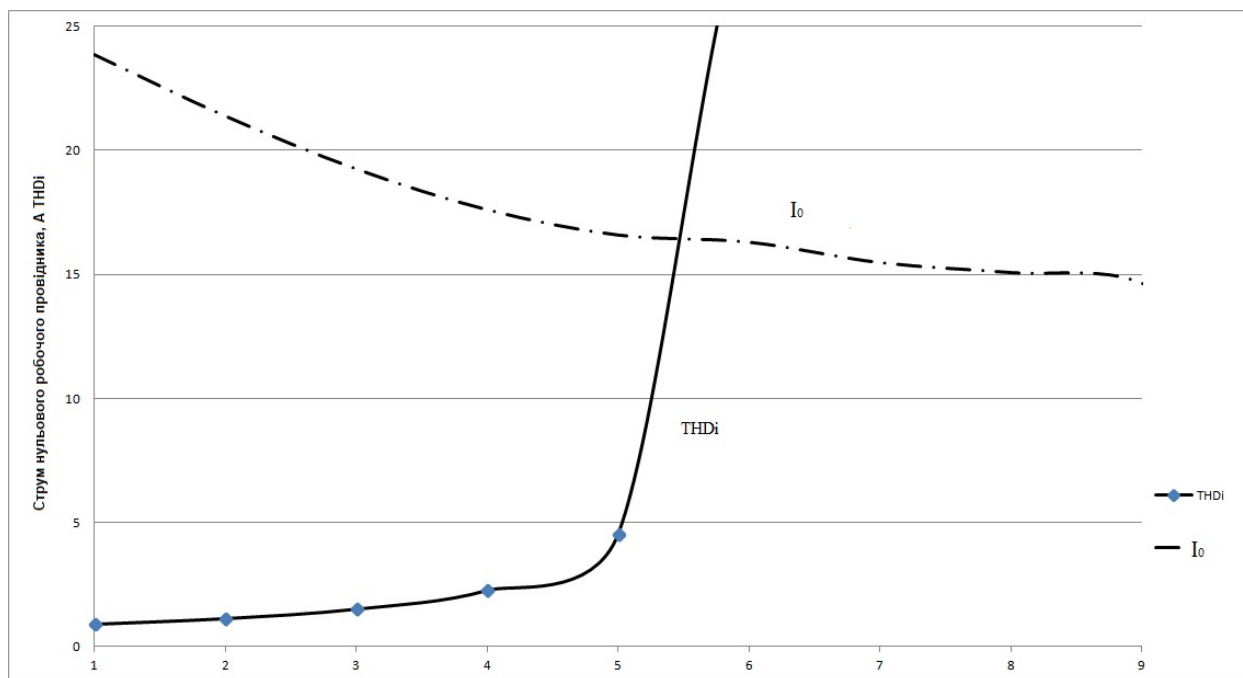


Рисунок 2.3 - Залежність зміни сумарного коефіцієнта гармонійних складових і струму нульового робочого провідника від нелінійності фазних гармонійних складових

2. Для трифазної чотирипровідної системи електропостачання можна визначити сумарні коефіцієнти гармонійних складових струму для кожної з фаз, проте пов'язати всі ці коефіцієнти з коефіцієнтами несиметрії і визначити залежність струму нульового робочого провідника від них неможливо у вигляді громіздкості математичних обчислень.

3. Коефіцієнти несиметрії фазних струмів за нульовою та зворотною послідовністю.

Пряме відношення до струму нульового робочого провідника має лише коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю. Однак згідно з ДСТУ 30804.4.30-2013 (ІЕС 61000-4-30:2008) «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Методи вимірювань показників якості

електричної енергії», цей коефіцієнт визначається тільки для напруг за значеннями фазної напруги основної гармоніки і не враховує несиметрію інших гармонійних складових, що не дозволяє повною мірою оцінити вплив цього коефіцієнта на струм у нульовому робочому провіднику [95], що додатково ілюструється залежностями, наведеними рисунку 2.4.

З аналізу залежностей на рисунку 2.4 можна зробити висновок про те, що при зміні інших несиметричних гармонійних складових фазних струмів коефіцієнт несиметрії фазних струмів за нульовою послідовністю залишається незмінним, тоді як струм у нульовому робочому провіднику змінює своє значення.

Тому запропоновано використовувати наступні нововведені показники якості електроенергії:

1. Показник, що визначає вплив несиметрії фазних струмів на струм нульового робочого провідника (далі K_A – показник несиметрії).

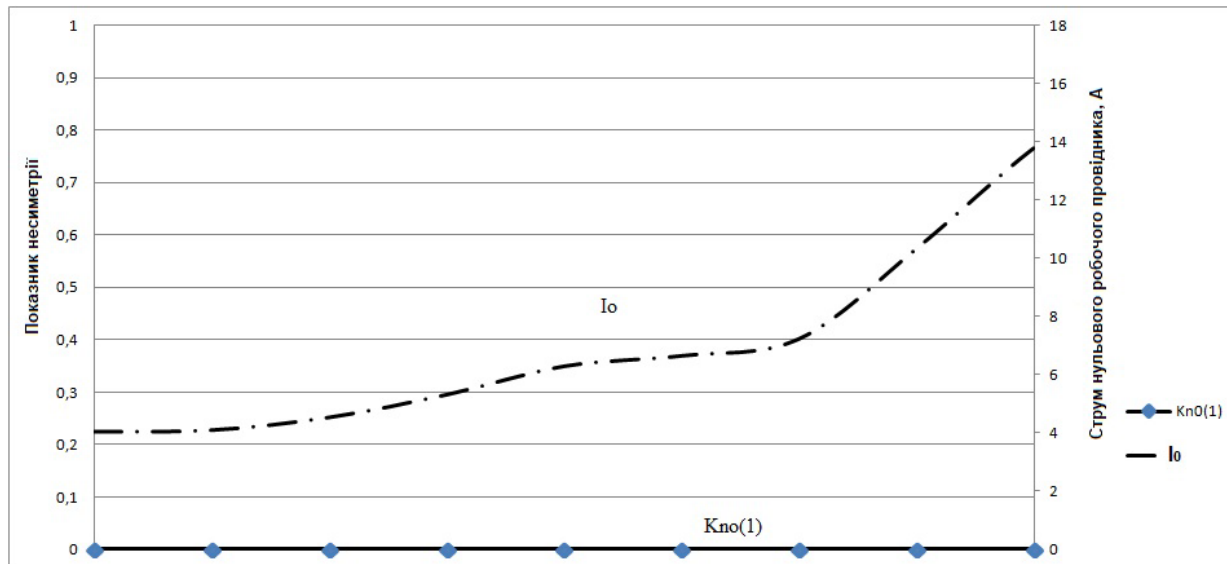


Рисунок 2.4. – Залежність зміни коефіцієнта несиметрії фазних струмів за нульовою послідовністю та струму нульового робочого провідника від несиметрії фазних гармонічних складових

$$K_A = \frac{\sqrt{I_{0(1)}^2 + I_{0(2)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_0}, \quad (2.3)$$

де $n=1,2,4,5,\dots$, крім $n=3(2k+1)$, де $k=0,1,2,\dots$, тобто. крім струмів гармонік, кратних трьох, $I_{0(n)}$ - гармонійна складова n -ної гармоніки, I_0 - струм нульового робочого провідника.

Значення показника можуть змінюватися від 0 до 1:

0 – при повній симетрії фазних струмів;

1 – за відсутності у складі струмів фаз гармонійних складових, кратних трьох.

Облік струмів гармонік, кратних трьом, у цьому показнику не проводиться, оскільки при несиметрії фазних струмів гармонік, кратних трьом, їх результуюча складова струму нульового робочого провідника може змінюватися тільки у бік зменшення. Тоді як для першої та інших вищих гармонік внаслідок несиметрії їхня результуюча складова в струмі нульового робочого провідника може тільки збільшуватися.

З урахуванням запропонованого показника залежності рисунку 2.4 приймуть вигляд, представлений рисунку 2.5.

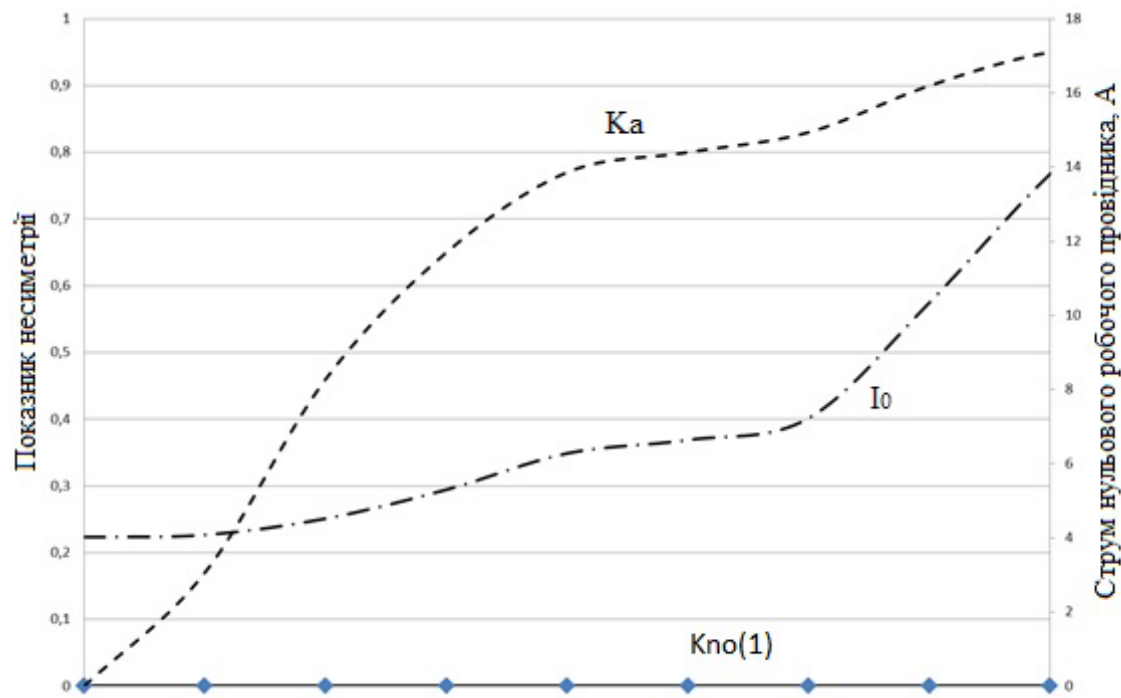


Рисунок 2.5 – Значення показника несиметрії, коефіцієнта несиметрії струмів фаз за нульовою послідовністю, а також струму нульового робочого провідника при несиметрії фазних гармонічних складових

З аналізу залежностей на рисунку 2.5 випливає, що пропонуваній ненормований показник несиметрії на відміну від існуючого коефіцієнта несиметрії фазних струмів за нульовою послідовністю змінює своє значення за будь-якої зміни струму нульового робочого провідника.

Крім того, для розрахунку показника несиметрії достатньо лише даних по нульовому робочому провіднику і не потрібні дані струмів усіх трьох фаз як для коефіцієнта несиметрії фазних струмів по нульовій послідовності.

2. Показник, що визначає вплив фазних струмів гармонік, кратних трьом, на струм нульового робочого провідника (далі K_B – показник несинусоїдності)

$$K_B = \frac{\sqrt{I_{0(3)}^2 + I_{0(9)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_0}, \quad (2.3)$$

де $n = 3(2k + 1)$, $k = 0, 1, 2 \dots$

Значення показника можуть змінюватися від 0 до 1:

0 – за відсутності фазних струмів гармонік, кратних трьом, або за скорочення всіх гармонійних складових, кратних трьом, через несиметрію;

1 – за відсутності несиметрії струмів фаз.

У цьому показнику враховуються тільки фазні струми гармонік, кратних трьом, оскільки за відсутності несиметрії фазних струмів у складі струму нульового робочого провідника будуть присутні тільки струми гармонік, кратних трьом, причому їх результуюча складова буде максимальною для всіх режимів трифазної роботи чотирипровідної низьковольтної електричної системи.

З урахуванням запропонованого показника залежності рисунку 2.3 приймуть вигляд, представлений на рисунку 2.6.

З аналізу залежностей на рисунку 2.6 випливає, що пропонуваній ненормований показник несинусоїдності на відміну від існуючого СКГС змінює своє значення при будь-якій зміні струму нульового робочого провідника і не набуває вигляду різних математичних невизначеностей, що дозволяє використовувати його для оцінки струму нульового провідника.

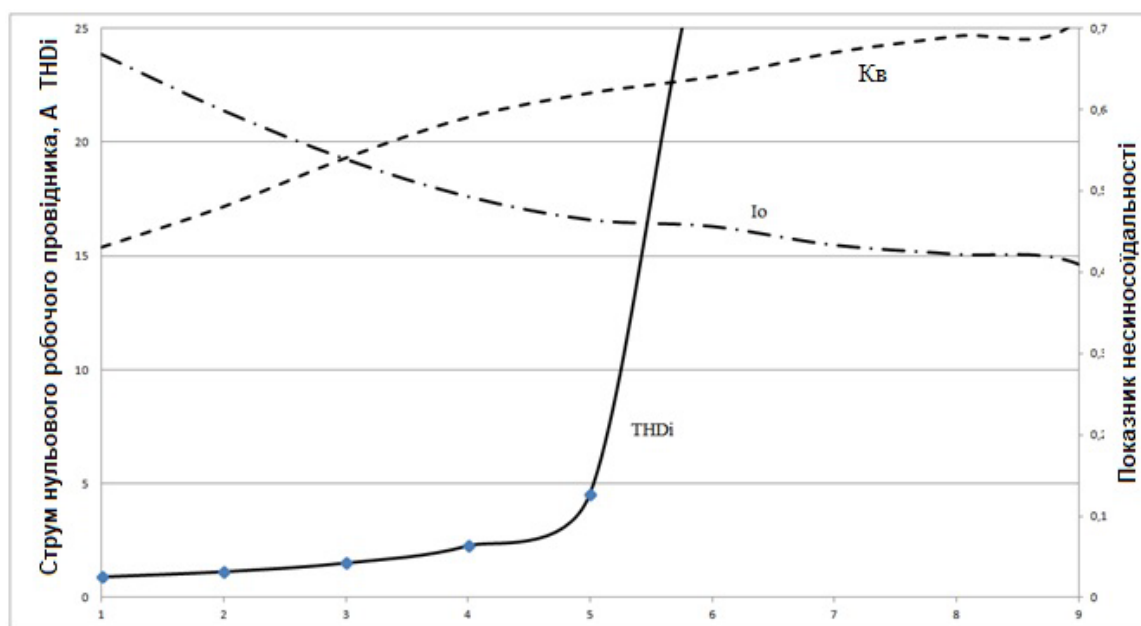


Рисунок 2.6 – Залежність зміни сумарного коефіцієнта гармонійних складових, показника несинусоїдальності та струму нульового робочого провідника від нелінійності фазних гармонійних складових

Важливим моментом при використанні цих показників є те, що за відсутності струму нульового робочого провідника ($I_0 = 0$), відпадає необхідність у їх визначенні, оскільки вони вводяться штучно та служать лише для визначення причини перевищення допустимих значень струмом нульового робочого провідника.

Як доказ правомірності запровадження двох нових показників, що показують вплив того чи іншого фактора, було проведено аналіз зміни величини струму в нульовому робочому провіднику при зміні амплітудних та фазних складових струмів основної та вищих гармонік у фазних провідниках.

Розглянемо зміну струму в нульовому робочому провіднику для наступних випадків - фазні струми містять:

1. Лише основну гармоніку – $n=1$;
2. Лише струми гармонік, кратних трьом – $n=3, 6, 9, 12\dots$;
3. Тільки парні гармоніки, крім струмів гармонік, кратних трьох – $n=2, 4, 8\dots$;
4. Тільки струми гармонік, крім перерахованих вище – $n=5, 7, 11\dots$

Для побудови графіків, представлених рисунку 2.7, амплітуда струму відповідної гармоніки живильної фази А змінювалася у бік зменшення від 100% (50 А) до 0%(0 А), струми у фазах і З залишалися незмінні.

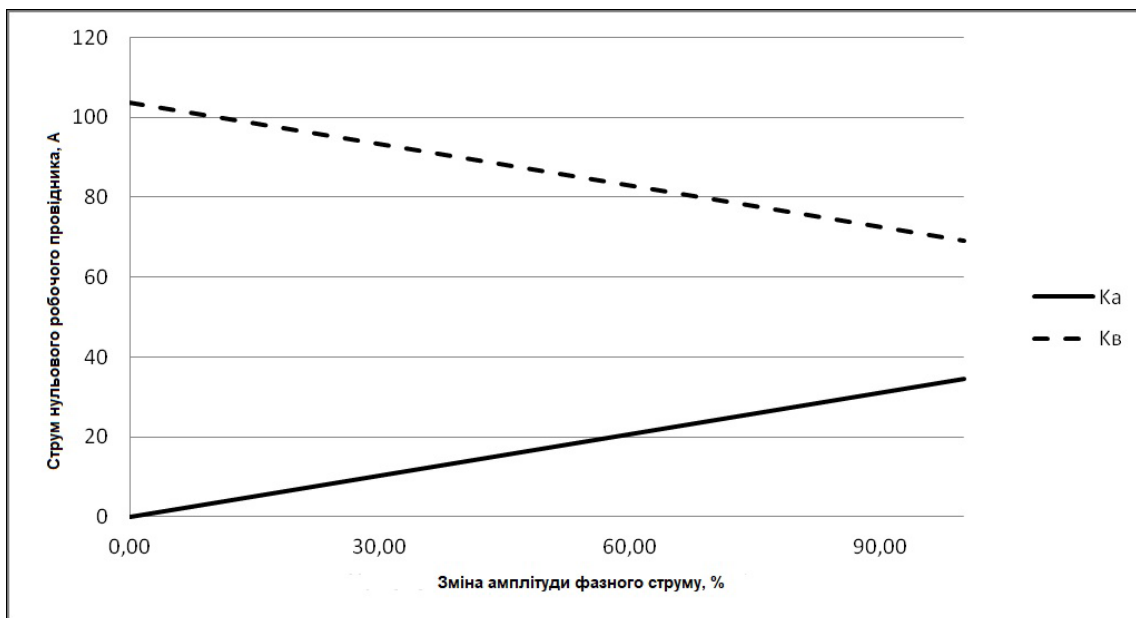


Рисунок 2.7 – Графік зміни струму нульового робочого провідника при зменшенні амплітуди фазного струму однієї з фаз живлення

Для побудови графіків, представлених рисунку 2.8, фазний зсув струму відповідної гармоніки живильної фази А змінювався від 0 до 180 градусів, фазні зрушення струму у фазах В і С залишалися незмінні.

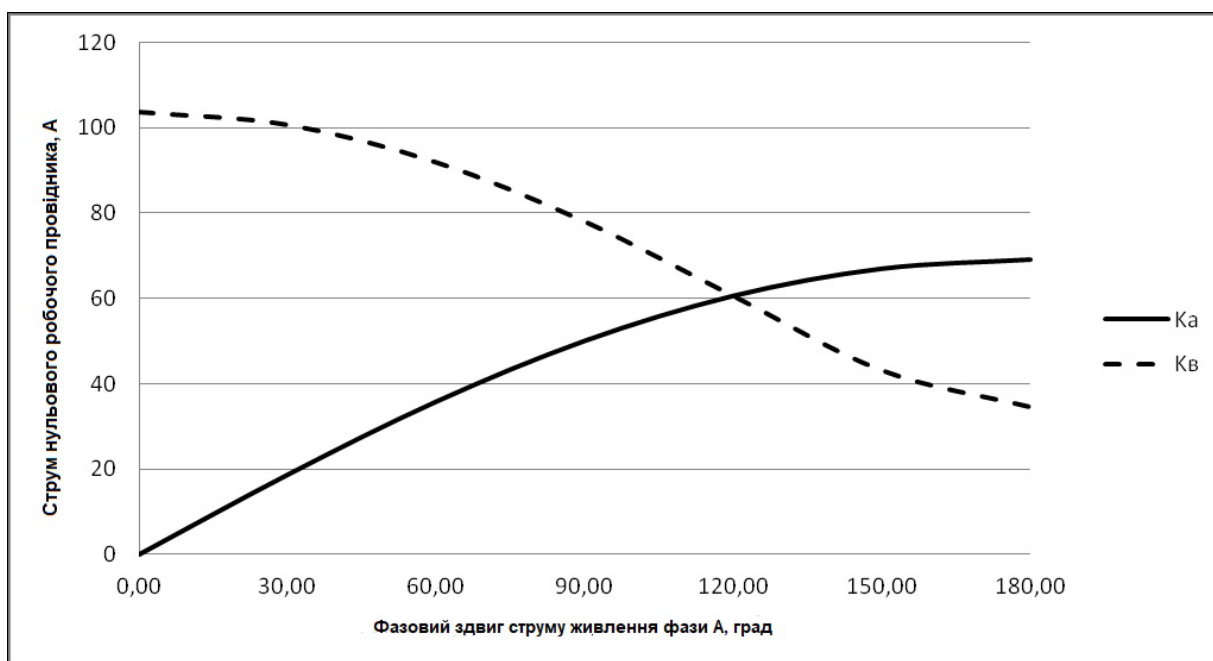


Рисунок 2.8 – Графік зміни струму нульового робочого провідника при зміні фазового зсуву струму живлення фази А

З аналізу залежностей на рисунках 2.7 і 2.8 можна дійти невтішного висновку у тому, що значення струму нульового робочого провідника має однаковий характер зміни для наступних розглянутих груп – 1, 2, 4, тоді як 3 група має діаметрально протилежний характер зміни значення струму в нульовому робочому провіднику, що і обґрунтовує необхідність запровадження двох нових коефіцієнтів для обліку впливу того чи іншого фактора, що впливає на значення струму в нульовому робочому провіднику.

2.2 Аналіз даних навантаження медичного закладу

З висновків, отриманих у розділі 1, випливає те, що несиметричні та несинусоїдальні режими роботи навантаження можуть однаково впливати на величину струму в нульовому робочому провіднику в трифазній чотирипровідній розподільній системі.

Для ілюстрації описаного вище впливу було проведено дослідження навантаження медичного закладу в м. Житомирі в мережі об'єкта, трифазної чотирипровідної мережі якого характерні нелінійні та несиметричні режими роботи.

Склад найпотужнішого навантаження об'єкта представлений у таблиці 2.2. Саме до вузлів приєднання цього навантаження підключалася вимірювальна апаратура та знімали добові графіки навантаження.

Таблиця 2.2 – Нелінійні та несиметричні енергоспоживачі

Тип навантаження	Тип виконання	Потужність
Маніто - резонансний томограф (МРТ)	Трифазне, навантаження симетричне	150 кВт
Комп'ютерний томограф (КТ)	Трифазне, навантаження несиметричне	50 кВт

Перелік вимірювального обладнання:

1. Аналізатор якості електроенергії Fluke 435;
2. Аналізатор якості електроенергії Ресурс УФ-2М.

На рисунках 2.9-2. представлені осцилограми напруги та струмів на шинах 0,38 кВ, а також струму нульового робочого провідника.

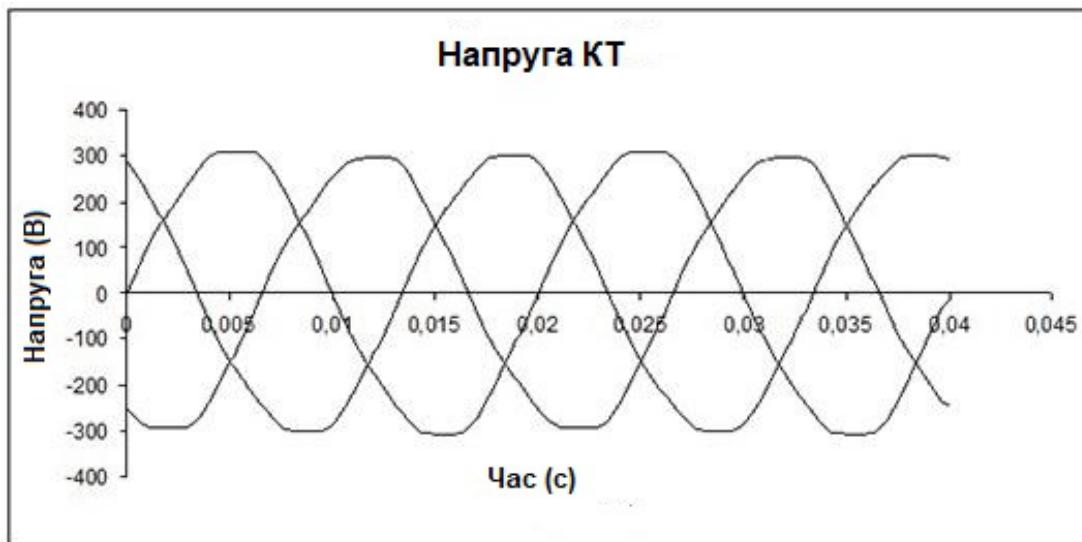


Рисунок 2.9 - Осцилограма напруги комп'ютерного томографа

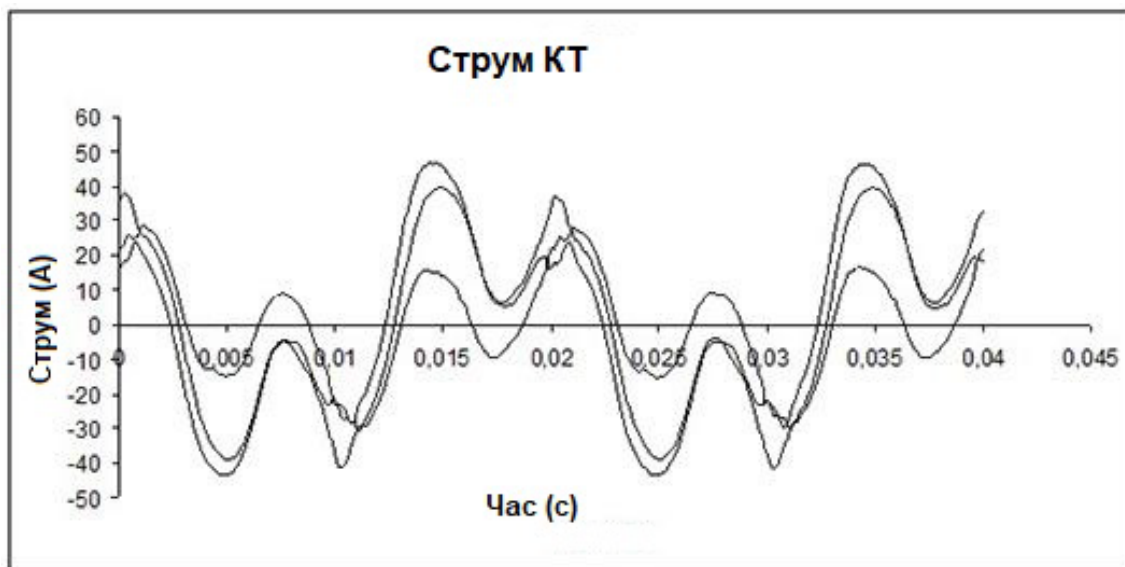


Рисунок 2.10 - Осцилограма струму комп'ютерного томографа

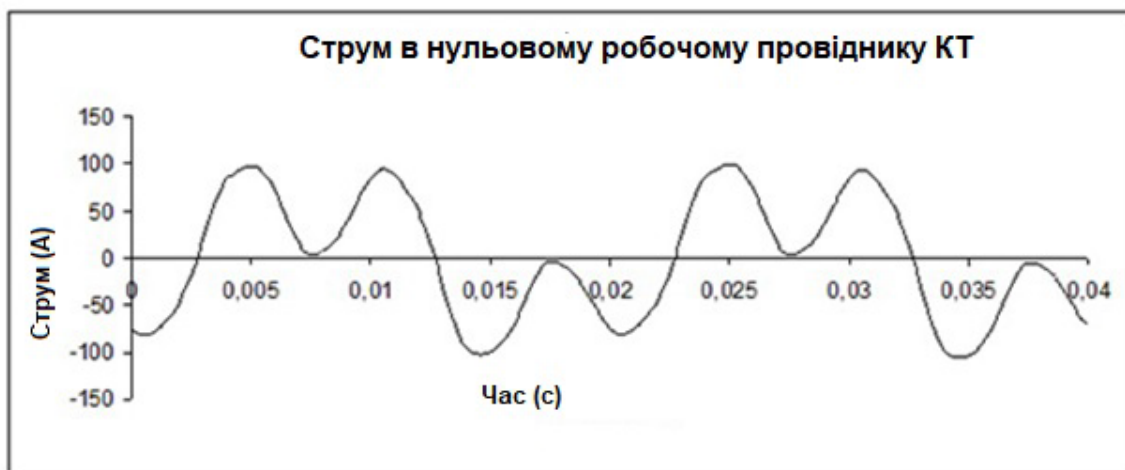


Рисунок 2.11 - Осцилограма струму в нульовому робочому провіднику комп'ютерного томографа

Для графіків, представлених на рисунках 2.9–2.11, виявлено, що напруги фаз КТ практично повністю симетричні і не містять у своєму складі значних гармонійних складових, на відміну від струмів, чинне значення яких становило: фаза А – 27 А, фаза В - 27 А, фаза С - 18,6 А, N - 70,8 А, що більш ніж у 2.5 рази вище фазних струмів.

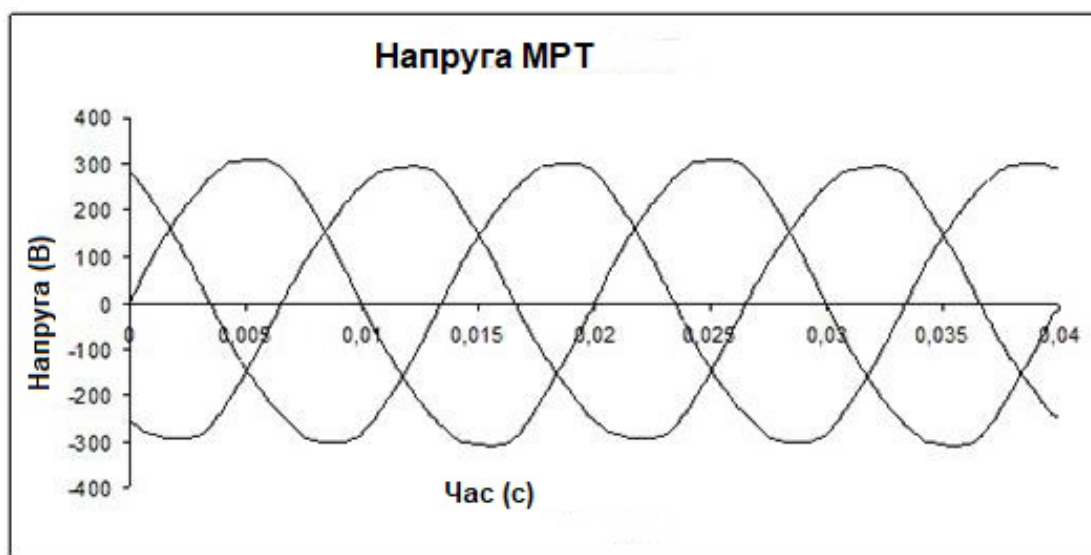


Рисунок 2.12 - Осцилограма напруги магніторезонансного томографа

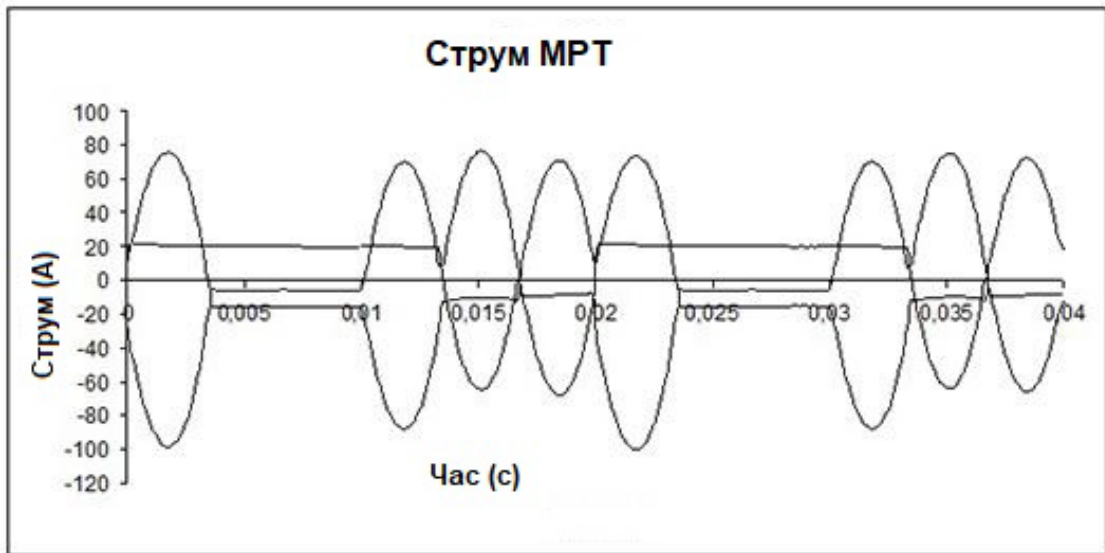


Рисунок 2.13 - Осцилограма струму магніторезонансного томографа

Потім у стандартному додатку програмного продукту MATLAB криві струми і напруги були розкладені в ряд Фур'є, що дозволило отримати спектральний склад, представлений на рисунках 2.14-2.2.12.

При аналізі отриманих залежностей враховувалося також те, що сумарне навантаження представляє собою поєднання трифазного і однофазного навантажень.

З залежностей, наведених на малюнках 2.5 і 2.12, випливає те, що в складі фазних струмів МРТ відсутні струми гармонік, кратних трьом, що призводить до незначного значення струму у нульовому робочому провіднику, т.к. і інші гармоніки струмів симетричні.

Крім того були отримані наступні результати:

- THDu не перевищує 2.6% що допускається нормативною документацією і пояснюється жорсткими параметрами мережі [99-100];
- THDi складає:
 - а) для комп'ютерного томографа - 180%;
 - б) для нульового робочого провідника КТ–100%;
 - в) для магніторезонансного томографа - 180%.
- значення запропонованих показників для струму нульового робочого

провідника КТ склали:

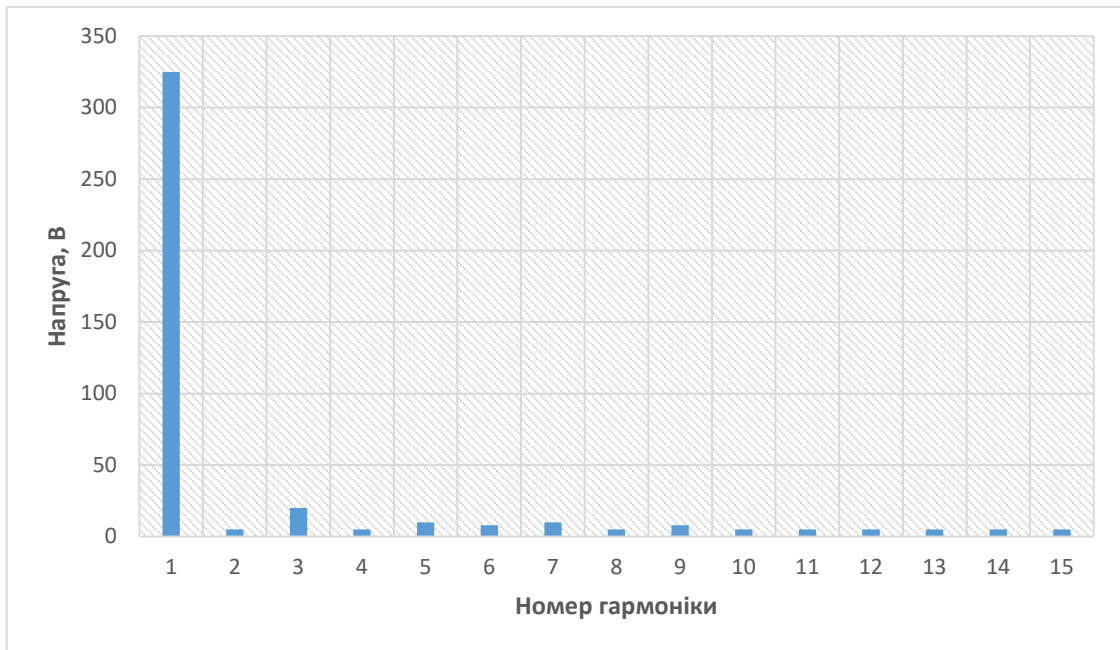


Рисунок 2.14 - Спектр напруги комп'ютерного томографа

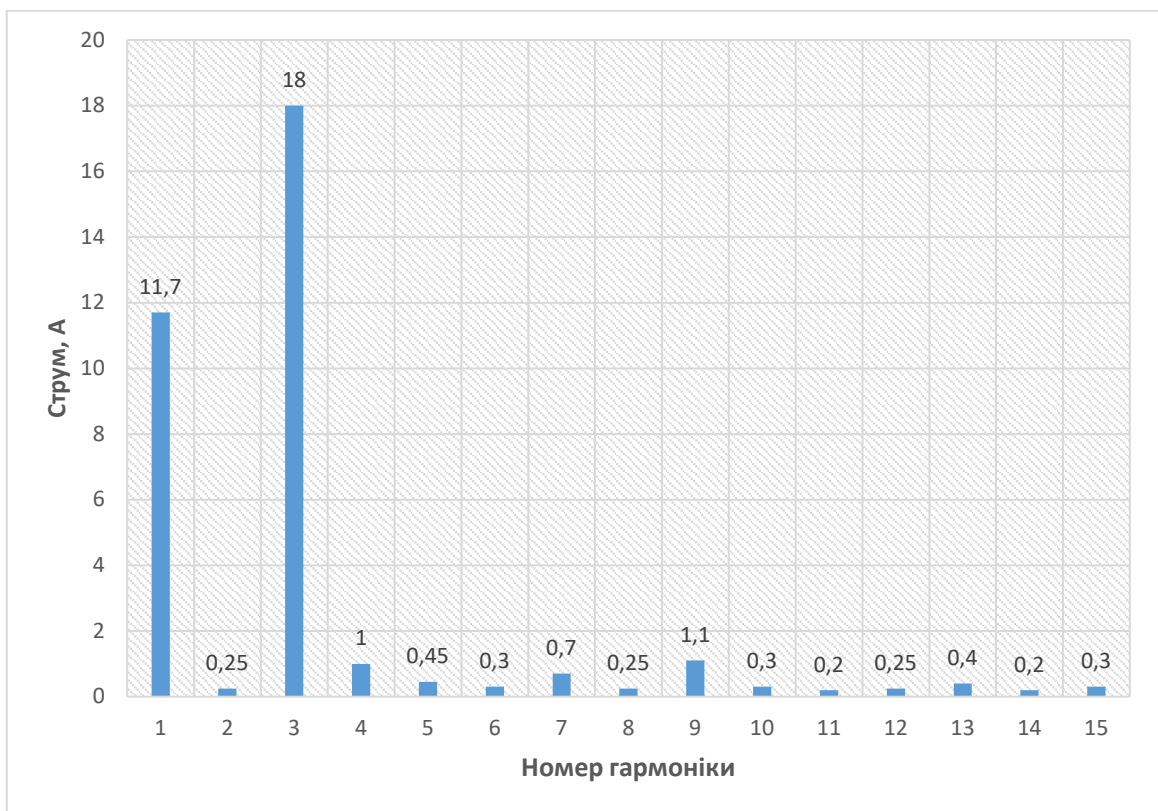


Рисунок 2.15 - Спектр струму комп'ютерного томографа

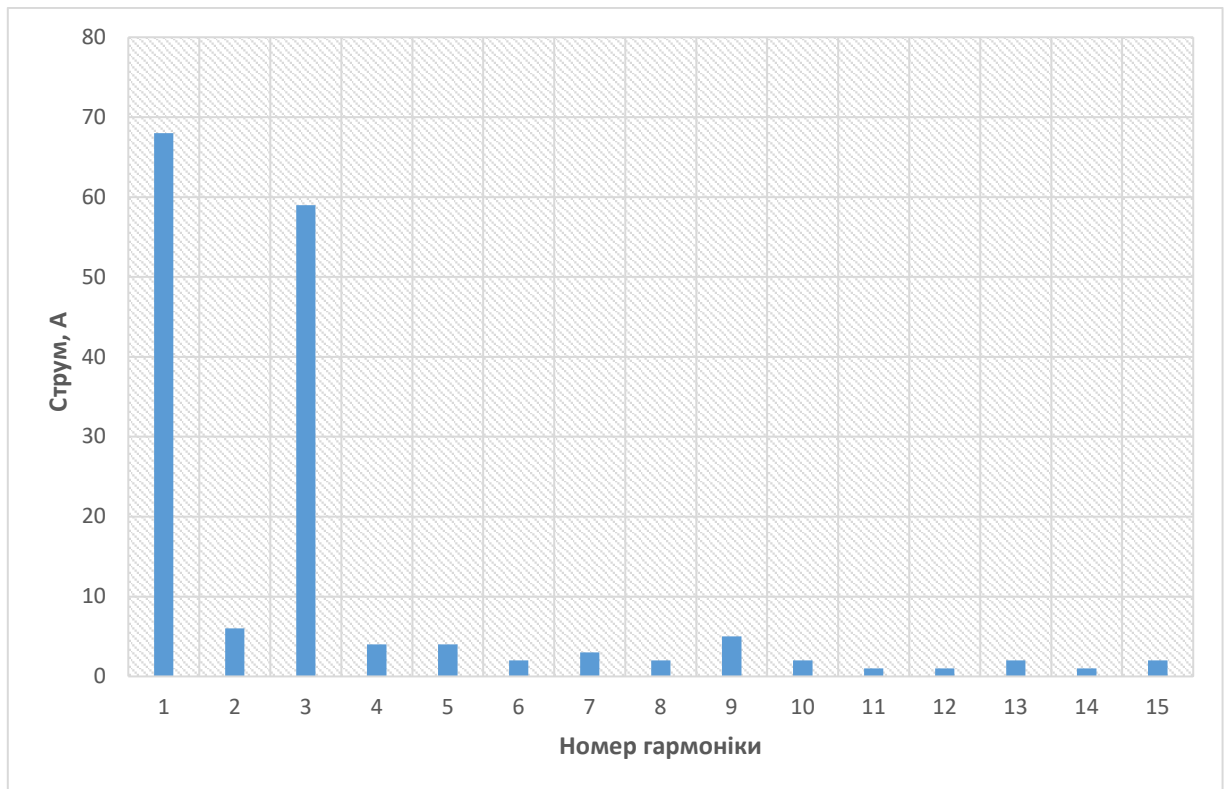


Рисунок 2.16 - Спектр струму нульового робочого провідника
комп'ютерного томографа

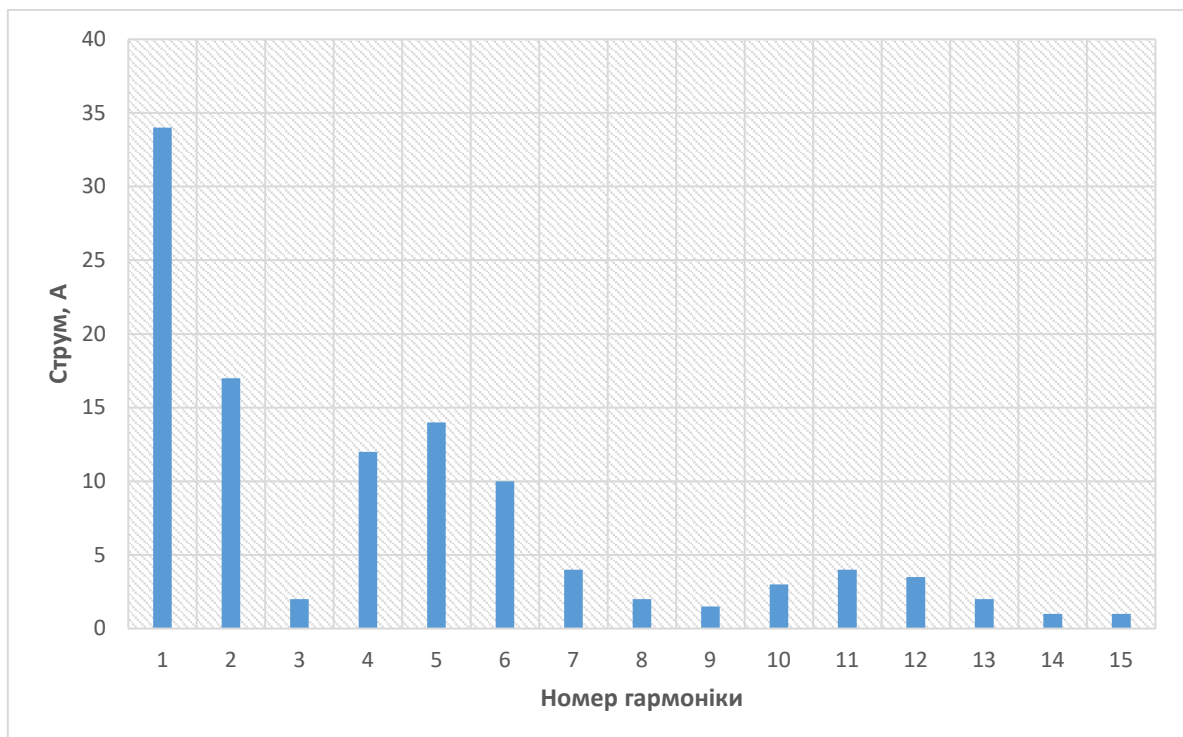


Рисунок 2.17 - Спектр струму магніторезонансного томографа

а) несиметрії - $K_A = 0,758$;

Б) несинусоїдальності - $K_B = 0,652$.

- фазні струми комп'ютерного томографа містять 1, 3, 5, 7, 9, 11 гармоніки, з яких найбільш виражений характером має третя;
- струм в нульовому робочому провіднику комп'ютерного томографа містить, крім першої, в здебільшому струми третьої гармонійної складової.

Висновки по другому розділу

З наведеного вище аналізу випливає, що:

1. Виявлено необхідність урахування спільного впливу несиметричних та несинусоїдальних режимів роботи навантаження на величину струму в нульовому робочому провіднику;
2. Розв'язання задачі розглядати не тільки для підприємств, що проектуються, але й для діючих, склад навантаження яких змінюється в результаті модернізації обладнання;
3. Необхідно ввести ненормовані показники несиметрії та несинусоїдності струму в нульовому робочому провіднику, які найбільш точно відображають вплив несиметрії та несинусоїдності фазних струмів на величину струму в нульовому робочому провіднику;
4. Оскільки для ненормованих показників несинусоїдності та несиметрії характерна відносна форма подання, необхідно розглянути можливість поширення їх застосування на всі трифазні чотирипровідні мережі, що мають у своєму складі як нелінійне, так і несиметричне навантаження.

РОЗДІЛ 3

ЗАЛЕЖНІСТЬ СТРУМУ В НУЛЬОВОМУ РОБОЧОГО ПРОВІДНИКА ВІД НЕНОРМОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У роботі виявлено, що однією з основних проблем, пов'язаних із струмом нульового робочого провідника в чотирипровідних мережах низької напруги, є проблема його перевантаження у зв'язку зі зміною навантаження, яке може бути як нелінійним, так і несиметричним.

У зв'язку з цим необхідно визначити залежність величини струму нульового робочого провідника від показників несиметрії і несинусоїдальності, а також виявити їх взаємовплив.

3.1 Вплив нелінійною навантаження на величину струму в нульовому робочому провіднику

Визначимо залежності величини струму нульового робочого провідника від показника несинусоїдності струму нульового робітника провідника.

Згідно ДСТУ 3466-96 «Якість електричної енергії. Терміни та визначення» «Площа поперечного перерізу нейтрального провідника повинна бути, по крайній мірі, дорівнювати площі поперечного перерізу лінійних провідників:

- в трифазних схемах, де частка струмів третьої гармоніки і гармонік, кратних трьом, лежить в межах від 15% до 33%.

Якщо частка третьою гармоніки перевищує 33%, необхідно збільшити площу поперечного перерізу нейтрального провідника ... »[17]

Таким чином, обмеження по перерізу нульового робітника провідника відсутні.

При підключенні нелінійного навантаження фазні струми гармонік, кратних трьом, складаються в нульовому робочому провіднику.

Встановлено, що при частці струмів гармонік, кратних трьох, понад 33% від величини фазного струму значення струму нульового робочого провідника може перевищувати значення фазних струмів (Рисунок 3.1).

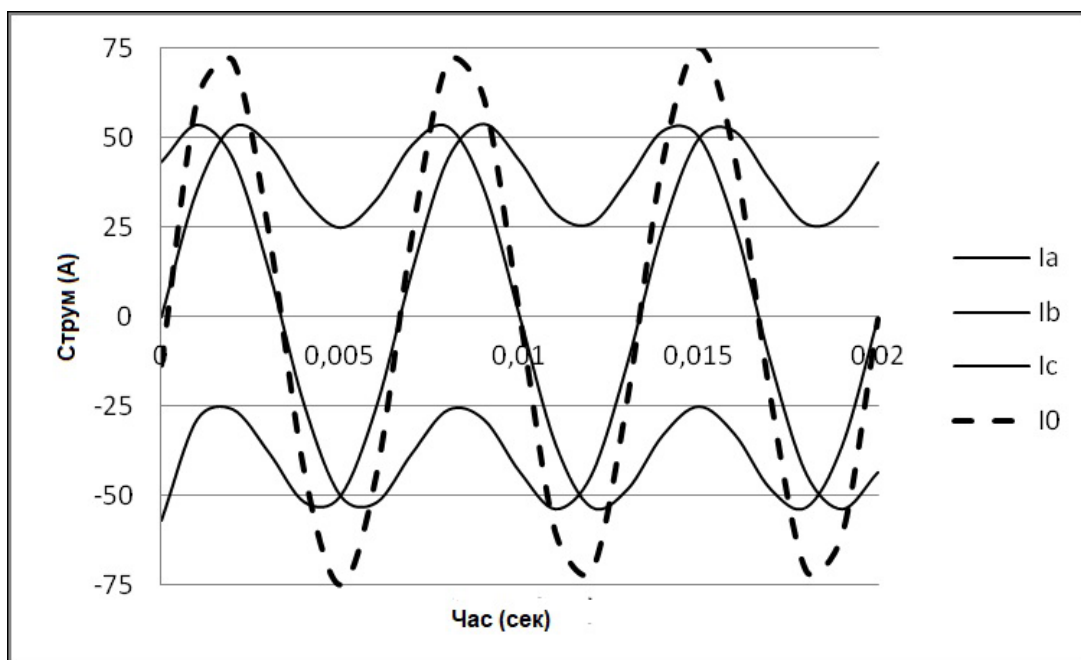


Рисунок 3.1 - Струми фаз та нульового робочого провідника при 50% частці струмів гармонік, кратних 3

При цьому визначено, що зі збільшенням показника несинусоїдальності струму нульового проводу, його значення зростає нелінійно, як показано на рисунку 3.2.

Залежність отримана аналітично та побудована у %, де за 100% прийнято діюче значення фазного струму симетричної системи за відсутності в його складі несинусоїдності.

У ході побудови графіка змінювалися фазні складники струмів гармонік, кратних 3, інші гармоніки були незмінні і відмінні від 0.

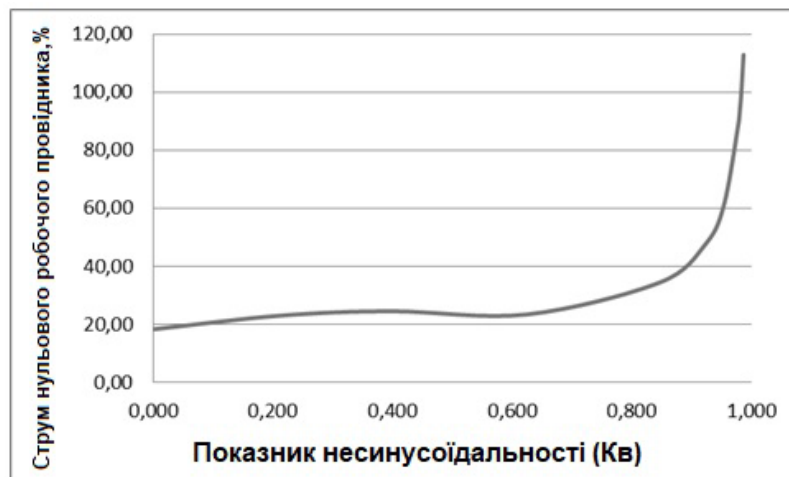


Рисунок 3.2 – Струм нульового робочого провідника в залежності від показника несинусоїдальності

З графіка слідує, що чим вище показник несинусоїдальності струму нульового робочого провідника при фіксованому співвідношенні несиметрії струмів фаз, то тим вище чинне значення струму нульового робочого провідника.

3.2 Вплив несиметричного навантаження на величину струму в нульовому робочому провіднику

Визначимо ступінь впливу несиметричного навантаження на величину струму в нульовому проводі, а саме визначимо залежності величини струму нульового проводу від показника несиметрії струму нульового робочого провідника.

На рисунку 3.3 показана залежність величини струму нульового проводу від показника несиметрії.

Залежність отримана аналітично та побудована у %, де за 100% прийнято діюче значення фазного струму симетричної системи за відсутності в його складі несинусоїдності.

У ході побудови графіка змінювалися інші гармоніки, фазні складники струмів гармонік, кратних 3, були незмінні і відмінні від 0.

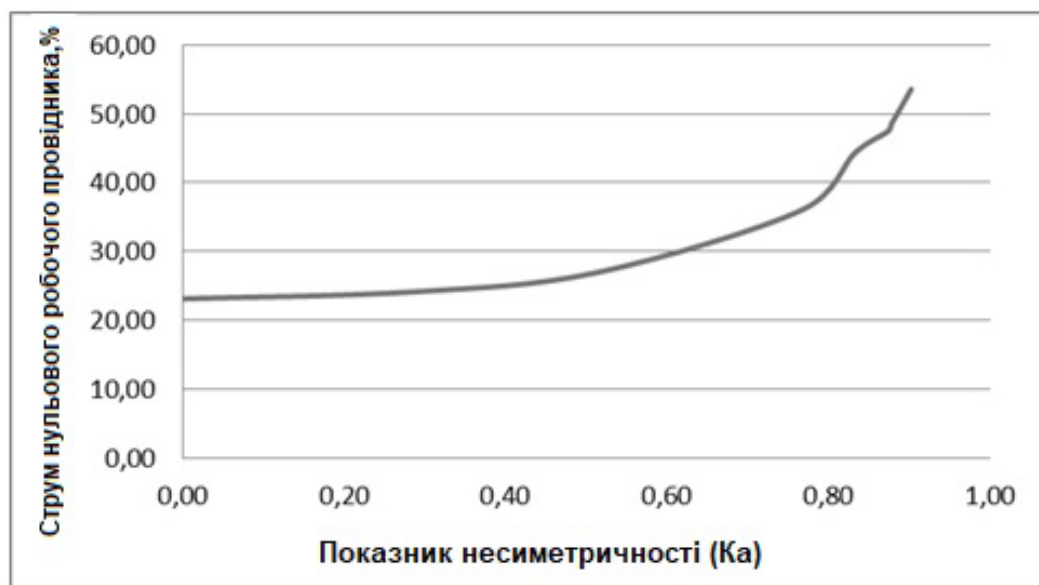


Рисунок 3.3 – Струм нульового робочого провідника в залежності від показника несиметрії

З аналізу графіка можна зробити висновок, що чим вище показник несиметрії, то тим вище чинне значення струму нульового робочого провідника.

Таким чином, з результатів досліджень, наведених у розділах 3.1 і 3.2, випливає, що за наявності несинусоїдності та несиметрії необхідно враховувати обидва цих фактора. Очевидно, що облік цих факторів повинен проводитися на основі визначення їх взаємовпливу.

3.3 Взаємодія показників несиметрії та несинусоїдальності на струм нульового робочого провідника

Проведемо аналіз взаємовпливу показників несиметрії і несинусоїдальності на струм нульового робочого провідника.

До цих пір не було визначено вплив на струм нульового робочого провідника показників несинусоїдальності і несиметрії в їх взаємозалежності.

Для визначення зазначеного впливу було створено математичну модель на основі відомих співвідношень для трифазної чотирипровідної електричної мережі, з допомогою якої визначався струм в нульовому робочому провіднику в % при зміні показників. Їх зміна було прийнято в інтервалі: $K_A = 0 \dots 1$, $K_B = 0 \dots 1$, оскільки за ці межі зазначені коефіцієнти виходити не можуть.

Математична модель представлена наступним чином:

Визначення струму нульового робочого провідника для синусоїдального режиму виробляється по виразу:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (3.1)$$

Крім того струм нульового проводу при несинусоїдальному режимі можна записати в вигляді:

$$i_0 = I_{0(1)} \sin(\omega t + \varphi_{(1)}) + I_{0(2)} \sin\left(2 \cdot (\omega t + \varphi_{(2)})\right) + \dots + I_{0(n)} \sin\left(n \cdot (\omega t + \varphi_{(n)})\right), \quad (3.2)$$

де n – номер гармоніки;

$I_{0(n)}$ - амплітуда струму нульового робочого провідника на n -гармоніці;

$\varphi_{(n)}$ - зсув фаз між струмом та напругою n -гармоніки;

$\omega = 2 \pi f$ – кругова частота, де f – частота змінного струму.

При несинусоїдальному режимі вираз для миттєвого значення n -ної гармонійної складової струму нульового робочого провідника набуває вигляду:

$$i_{0(n)} = I_{A(n)} \sin(\omega \cdot t + \varphi_{A(n)}) + I_{B(n)} \sin(n \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{B(n)} - 120^\circ)) + I_{C(n)} \sin(n \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{C(n)} + 120^\circ)). \quad (3.3)$$

Миттєві значення фазних струмів для несинусоїдального режиму визначаються по виразу:

$$i_A = I_{A(1)} \sin(\omega \cdot t + \varphi_{A(1)}) + I_{A(2)} \sin(2 \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{A(2)})) + \dots + I_{A(n)} \sin(n \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{A(n)})). \quad (3.4)$$

Оскільки форма струму нульового робочого провідника у загальному випадку має відмінний від синусоїди вид, то чинне значення струму нульового робочого провідника необхідно визначати по виразу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_0^2 dx}, \quad (3.5)$$

де T - тривалість періоду, для електричних мереж спільного користування, яка становить $1/f = 1/50 = 0,02$ с.

Слід підкреслити, що оскільки K_B і K_A характеризують не потужність навантаження, а лише її співвідношення по несиметрії та наявності вищих гармонік, отримані результати можна узагальнити на будь-яке навантаження, підключене до чотирипровідної мережі.

Для ілюстрації взаємозалежності вищеописаних коефіцієнтів в результаті математичного моделювання для різних значень K_A і K_B були отримані залежності, що представлені на рисунках 3.4.

З аналізу графіків можна зробити висновок, що існує така точка перетину цих залежностей, по один бік від якої ефективно застосування пристроїв компенсації несиметрії, а по інший - пристроїв компенсації несинусоїдності.

Оскільки:

$$\sqrt{K_A^2 + K_B^2} = \frac{\sqrt{I_{0(1)}^2 + I_{0(2)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_{(0)}} = 1, \quad (3.6)$$

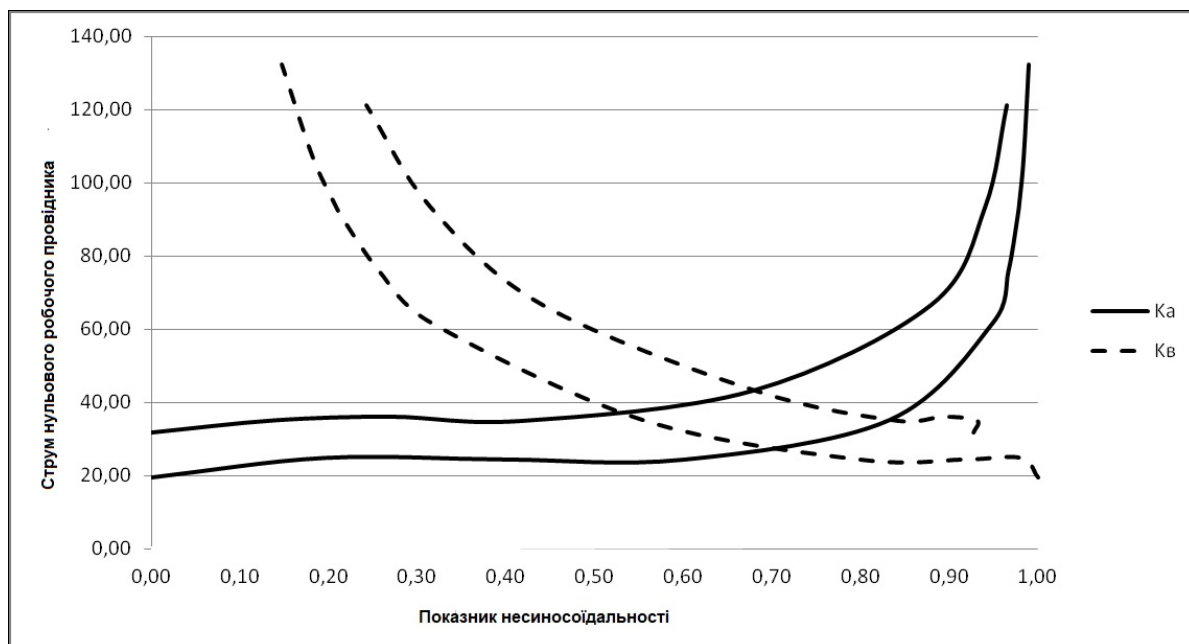


Рисунок 3.4 – Струм нульового робочого провідника в залежності від показників несинусоїдальності та несиметрії

де $n=1,2,3,4,5,\dots$,

то ця точка складає значення $K_{\text{крит}}=0,707$, що підтверджується графіками на рисунку 3.4.

Висновки по третьому розділу

З аналізу залежностей виявлено, що:

1. Якщо розрахунковий показник несиметрії K_A вище за значення $K_{\text{крит}}$, то основний внесок у величину струму нульового робочого провідника вносить несиметрія фазного навантаження;
2. Якщо розрахунковий показник несинусоїдальності K_B вище значення $K_{\text{крит}}$, то основний внесок у величину струму нульового робочого провідника вносить нелінійність фазного навантаження;
3. Якщо розрахункові показники несиметрії та несинусоїдальності рівні значення $K_{\text{крит}}$, то внесок несиметрії та нелінійності фазного навантаження рівнозначний.

ВИСНОВКИ

В ході роботи запропоновано та обґрунтовано запровадження двох нових коефіцієнтів: показника по несиметрії (K_A) та несинусоїдності (K_B) – що дозволяють визначити вклад того чи іншого фактора виникнення струму у нульовому робочому провіднику на величину цього струму. Крім того названі та проаналізовані непрямі фактори, які можуть будь-яким чином впливати на величину струму в нульовому робочому провіднику та обмежувати його.

Проведено експериментальне дослідження у трифазній чотирипровідній мережі реального медичного об'єкта, що підтверджує можливість виникнення струму нульового робочого провідника, що перевищує фазні струми і має у своєму складі як струми гармонік, кратних трьох, так і струми інших гармонік, включаючи основну.

Проведено аналіз залежностей значення струму в нульовому робочому провіднику від запропонованих показників, у результаті виявлено можливість визначення основної причини виникнення струму в нульовому робочому провіднику. Визначено граничне значення розрахункових показників K_A і K_B – $K_{крит}=0,707$, вище якого однозначно той чи інший фактор робить найбільш вагомий внесок у значення струму нульового робочого провідника.

Виявлено залежності ненормованих показників несиметрії та несинусоїдності струму нульового робочого провідника та отримано наступні висновки:

1. Якщо розрахунковий показник несиметрії K_A вище за значення $K_{крит}$, то основний внесок у величину струму нульового робочого провідника вносить несиметрія фазного навантаження;
2. Якщо розрахунковий показник несинусоїдності K_B вище значення $K_{крит}$, то основний внесок у величину струму нульового робочого провідника вносить нелінійність фазного навантаження;
3. Якщо розрахункові показники несиметрії та несинусоїдності рівні значення $K_{крит}$, то внесок несиметрії та нелінійності фазного навантаження рівнозначний.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3466-96 Якість електроенергії. Терміни та визначення..
2. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.
3. Параметри якості електроенергії в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації . Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310.
4. Букович Н.В. Автоматика електроенергетичних систем: Навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1998. – 280 с
5. Губаревич О.В. (2016) Надійність і діагностика електрообладнання: підручник. Сєверодонецьк, Вид-во СНУ ім. В. Даля.
6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2007, IDT) (2014) Характеристики напруги електроживлення, постачаної розподільчими мережами загальної призначеності. Київ, Мінекономрозвитку України.
7. Жемеров Г. Г. Энергоефективність систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії : монографія / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 272 с
8. Півняк Г. Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання : навч. посібник / Г. Г. Півняк, Г. А. Кігель, Н. С. Волотковська; за ред. Г. Г. Півняка. – 4-те вид, доопрац. і доп. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. – 223 с.
9. Визначення джерела вищих гармонік у системах електропостачання зі змішаним навантаженням / Д. О. Гапон, А. О. Зуєв, П. О. Качанов, Б. І. Кубрик // Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 55-60.
10. Бурбело, М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 159 с.

11. Сабат, М., Лисяк, В., Шелех, Ю., Чечель, В.. ВПЛИВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ НА РОБОТУ ВУЗЛА КОМПЛЕКСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З КОНДЕНСАТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ. *Технічні науки та технології*, (3(25), 244–255.

[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-244-255](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-244-255)

12. Енергозберігаючі технології в електропостачанні : конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, І. І. Борзенков, І. М. Дяговченко, Т. М. Загородня. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 99 с.

13. Саєнко Ю. Л. Зниження рівнів гармонійних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік / Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, Є. В. Бараненко // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 3. – С. 78–83

14. https://forca.com.ua/knigi/navchannya/konspekt-lekcii-z-kursu-elektrichni-sistemi-i-merezhi_14.html

15. Сиченко В.Г., Саєнко Ю.Л., Босий Д.О.: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ: Монографія/ За загальною редакцією Сиченка В.Г. – Дн-вск: Видавництво ПФ “Стандарт-Сервіс”, 2015.- 344 с.-ISBN 978-966-97463-8-2

16. Адамова С. В. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ СТРУМОПРИЙМАЧІВ// Таврійський державний агротехнологічний університет. Науковий вісник ТДАТУ Вип. 8, том 2

17. Харченко В.Ф. Електропостачання міст і промислових підприємств: Конспект лекцій для студентів 4 - 5 курсів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 0906 „Електротехніка” (6.050701 „Електротехніка та електротехнології”) / В.Ф. Харченко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 168 с.