

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

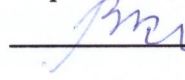
Бакалаврська дипломна робота на тему:

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Виконав: студент 4 курсу, гр. 1ЕМ-206
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Олександр КИЛАВЧУК
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: д.т.н. проф.

Василь КУТІН
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«28» 05 2024 р.

Рецензент: Терешкевич Л. Б.

(прізвище та ініціали)

«10» 06 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК 

«28» 05 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

«11» 03 2024 року

ЗАВДАННЯ

На бакалаврську кваліфікаційну роботу студенту

Киравчуку Олександр Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням

керівник роботи Кугін Василь Михайлович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «11» 03 2024 року № 80.

2. Строк подання студентом проекту (роботи): _____

3. Вихідні дані до роботи: Розподільна мережа напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням; причини порушень електромагнітної сумісності в розподільних мережах; вплив вищих гармонік на різні види електрообладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): сучасний стан досліджень проблеми електромагнітної сумісності в розподільних мережах напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням; основні причини порушення електромеханічної сумісності ; вплив вищих гармонік на роботу різних видів електрообладнання; методи оцінювання рівня електромагнітної сумісності; моделювання і розрахунок струму і напруги в розподільних мережах з нелінійним навантаженням; завдання нелінійних навантажень джерелами струму.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): назва роботи, мета, об'єкт, предмет, задачі дослідження; актуальність дослідження; причини порушень електромеханічної сумісності; допустимі значення струмів вищих гармонік; моделювання нелінійних навантажень; розрахунок струмів і напруги розподільних мереж з нелінійним навантаженням; аналіз аналітичних залежностей і значень гармонік струму і напруги; загальні висновки по роботі.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Кутін В.М. д.т.н., проф., зав.каф. КЕМСК	11.03.2024 <i>[підпис]</i>	28.05.2024 <i>[підпис]</i>
Охорона праці	Кобилянський О.В., д.пед.н, зав.каф. БЖДПБ	11.03.24 <i>[підпис]</i>	28.05.2024 <i>[підпис]</i>

7. Дата видачі завдання 11.03.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)	11.03.2024	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	21.05.2024	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	28.05.2024	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	28.05.2024	
5	Попередній захист БДР	28.05.2024	
6	Нормоконтроль БДР	28.05.2024	
7	Рецензування БДР	10.06.2024	
8	Захист БДР	11.06.2024	

Студент

[підпис]
(підпис)

Кишак О.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

[підпис]
(підпис)

Кутін В.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Килавчук Олександр Валерійович «Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000В з нелінійним навантаженням». Бакалаврська дипломна робота. Вінниця: ВНТУ. 2024. 91 с. На укр. мові. Бібліографій: 21. Рисуноків: 20. Таблиць: 9.

Загальну частину роботи присвячено розгляду сучасного стану досліджень і особливостей проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) в електричних мережах напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням; проведено аналіз існуючих математичних моделей мереж напругою до 1000 В з нелінійними навантаженнями і визначено області їх доцільного використання; розроблено модель електричної мережі будівлі з урахуванням параметрів її основних елементів і характерних електроприймачів; визначено правила еквівалентування навантажень і побудови еквівалентної схеми заміщення мережі з оптимальною кількістю вузлів навантажень; розроблено методику визначення параметрів схеми заміщення мережі напругою до 1000 В і підключених до неї електроприймачів, ґрунтуючись на загальноприйнятих нормах і підходах до проектування подібних електричних мереж проведено розрахунки несинусоїдальності струмів і напруг в різних режимах електричної мережі суспільної будівлі.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, мережі напругою до 1000 В, нелінійні споживачі, несинусоїдальність.

ABSTRACT

Kylavchuk Oleksandr Valeriyovych "Modeling and analysis operating modes of the networks with a voltage of up to 1000 V with a non-linear load". The Bachelor's thesis. Vinnytsia: VNTU. 2024. 91 p. In Ukrainian language. Bibliographies: 21. Figures: 20. Tables: 9.

The general part of the work was dedicated to consideration of the current state of research and specifics of the problem of electromagnetic compatibility (EMC) in the electrical networks with a voltage of up to 1000 V with a non-linear load; the analysis of the existing mathematical models of networks with a voltage of up to 1000 V with non-linear loads was carried out and the areas of their appropriate use was determined; a model of the electrical network of the building was developed, taking into account the parameters of its main elements and distinctive power consumers; the rules for equating loads and building an equivalent network replacement scheme with the optimal number of load nodes was defined; a methodology for determining the parameters of the network replacement scheme with a voltage of up to 1000 V and the electrical receivers connected to it was developed, it based on generally accepted standards and approaches to the design of similar electrical networks, calculations of non-sinusoidal currents and voltages in different modes of the electric network of a public building was carried out.

Keywords: electromagnetic compatibility, voltage networks up to 1000 V, non-linear consumers, non-sinusoidality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В МЕРЕЖІ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМИ СПОЖИВАЧАМИ.....	11
1.1. Причини порушень електромагнітної сумісності в мережах до 1000 В	11
1.2. Вплив вищих гармонік на різні види електроустаткування розподільних мереж	18
1.3. Оцінювання електромагнітної сумісності в розподільних мережах.....	26
Висновки по розділу 1	34
2 МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ РЕЖИМІВ МЕРЕЖ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ.....	36
2.1 Моделювання нелінійних навантажень	36
2.2. Моделювання і розрахунок струмів і напруг мереж НН з нелінійними навантаженнями	42
2.3. Моделі мереж до 1000 В, в яких нелінійні навантаження задаються джерелами струмів.....	50
2.4. Аналіз залежностей величин вищих гармонік струму і напруги за допомогою традиційних моделей.....	58
Висновки по розділу 2	68
3 ОХОРОНА ПРАЦІ	70
3.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	70
3.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	70
3.1.2 Електробезпека	73
3.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	74
3.2.1 Мікроклімат	74
3.2.2 Склад повітря робочої зони.....	74
3.2.3 Виробниче освітлення.....	75
3.2.4 Виробничий шум	76
3.3. Пожежна безпека	77

ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
Додаток А	84
Додаток Б.....	88
Додаток В	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЕП-система електропостачання

ПЛЕП- повітряна лінія електропередач

ВМП-визначення місця пошкоджень

ЕП- електроприймач

ТП- трансформаторна підстанція

ЕМС-електромагнітна сумісність

ПП –перехідний процес

НН- напруга до 1000 В

ВГ – вищі гармоніки

КЛЛ – компактні люмінесцентні лампи

ККД – коефіцієнт корисної дії

ДВЕЖ – джерело вторинного електроспоживання

ЕМБ – електромагнітний баласт

ПЯЕ – показники якості електроенергії

МЕП – модель енергетичного процесу

ЯЕ – якість електроенергії

ЕМС – електромагнітна сумісність

ВСТУП

Актуальність теми. Надійність електропостачання має першочергове значення при розробці електричних систем для впровадження новітніх технологій. Режим роботи електростанції визначається графіком електричних і теплових навантажень в зоні живлення. Робота електростанції повинна забезпечувати дотримання графіків навантажень з урахуванням втрат енергії.

Зростання потужності нелінійних, а також несиметричних і різко змінних навантажень промислових підприємств призвело до істотного збільшення рівня електромагнітних впливів як в системах електропостачання підприємств, так і енергетичній системі. Ці впливи, в залежності від їх характеру, інтенсивності та тривалості, несприятливо впливають на силові електроустановки, системи автоматики та релейного захисту, телекомунікації, а також на електрообладнання малих груп споживачів. Зараз існує декілька принципів вимірювання якості електричної енергії, але єдина методика перевірки якості поки що не сформована. Також немає приладів для вимірювання нелінійних змін в електричній системі.

Проведемо аналіз існуючих вітчизняних і зарубіжних стандартів у області якості електроенергії і електромагнітна сумісність (ЕМС) і відзначимо негативну тенденцію до збільшення допустимих меж показників якості електричних мереж (ПЯЕ) в частині несинусоїдальності напруги. Обґрунтуємо висновок про необхідність вдосконалення власної нормативно-правової бази електротехніків частині нормування емісії гармонійних складових струму для контролю роботи споживача з метою виявлення емітентів погіршень ПЯЕ. Окрім того нормування вищих гармонік струму повинне стимулювати створення принципово нового обладнання і поліпшення характеристик старого з метою забезпечення ЕМС. Визначено, що проблема ЕМС є проблемою сумісного функціонування різних електроспоживачів в конкретній системі електропостачання (СЕП). Для прогнозування і оцінки можливих наслідків зростання нелінійних навантажень, проведення робіт по діагностиці і аналізу СЕП, а також вироблення вимог до

нелінійних електроприймачів, параметрам мережі і засобам забезпечення їх ЕМС необхідна розробка адекватних математичних і фізичних моделей електричних мереж з нелінійними навантаженнями.

Розглянемо математичні моделі низьковольтних мереж з нелінійним навантаженням, визначимо величину спотворень синусоїдальності кривих струмів і напруг мереж напруга до 1000 В (НН) із зосередженим в одному вузлі навантаженням. Це можуть бути або нерозгалужені автономні мережі з навантаженням, що має в своєму складі радіоелектронну апаратуру з ДВЕЖ з безтрансформаторним входом, або розподільні (міські або сільські) мережі НН, що живлять навантаження крупних об'єктів (будівель, підприємств), яке має в своєму складі нелінійні електроприймачі.

Отже, з вище сказаного слідує, що дана робота в цілому є актуально піднятою темою. Призначення - розвиток теорії електромагнітної сумісності процесів в розподільних мережах напругою до 1000 В.

Мета і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної дипломної роботи є підвищення рівня безпеки, надійності та ефективності використання мережі при її експлуатації.

Основними задачами, відповідно, є:

1. Дослідження вже відомих методів моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням.
2. Розвиток теорії електромагнітної сумісності процесів в розподільних мережах напругою до 1000 В.
3. Розглянути математичні моделі низьковольтних мереж з нелінійним навантаженням.
4. Проаналізувати існуючі вітчизняні і зарубіжні стандарти в області якості електроенергії і електромагнітної сумісності.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної бакалаврської дипломної роботи є мережа до 1000 В з нелінійним навантаженням.

Предметом дослідження є моделювання та аналіз режимів роботи до 1000 В з нелінійним навантаженням.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використано методи математичного моделювання.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст бакалаврської дипломної роботи, отримані автором самостійно.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В МЕРЕЖІ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМИ СПОЖИВАЧАМИ

1.1. Причини порушень електромагнітної сумісності в мережах до 1000 В

Під електромагнітною сумісністю розуміють здатність електроприймача нормально функціонувати в оточуючому електромагнітному середовищі і не вносити в це середовище перешкод, що порушують роботу інших електроприймачів. Під середовищем розуміють як мережу електропостачання, так і електромагнітні поля. При цьому поняття ЕМС охоплює не тільки взаємний вплив електроприймачів або їх елементів, але і взаємний вплив електроприймачів і мережі, оскільки мережа містить в собі комплекс різних дій всіх електроспоживачів, приєднаних на всій її протяжності.

У електропостачанні термін ЕМС набув широке поширення і одержав форми, обумовлені різноманітністю існуючих електроприймачів, які можуть бути як відносно потужними (силовими) – синхронні і асинхронні двигуни, статичні і машинні перетворювачі, зварювальні агрегати і інші електротехнологічні установки, так і невеликої одиничної потужності – засоби комп'ютерної техніки, електропобутові прилади і ін. Всі ці споживачі об'єднані мережею електропостачання (за винятком автономних систем), що викликає необхідність визначення ступеня дії на мережу електромагнітних перешкод, що виникають в результаті роботи окремих електроприймачів.

Під електромагнітною перешкодою (надалі перешкодою) розуміють електричне і (або) магнітне явища (процеси), створені будь-яким джерелом в просторі або в провідному середовищі і небажано впливають або здатні зробити небажаний вплив на стан електроприймача (функціонування, ефективність використання, втрати, старіння ізоляції і т. д.). Носіями перешкод виступають постійні або змінні в часі значення напруги, струму, електричного заряду або магнітного потоку[1].

Перешкоди можна класифікувати по великому числу ознак. Залежно від шляхів розповсюдження перешкоди розділяють на просторові і кондуктивні, по передбаченості часу появи і форми – випадкові (вірогідність) і регулярні (систематичні). Перешкоди з мережі живлення змінного струму можна підрозділяти на імпульсні (короткочасні) і тривалі. Дослідження електромагнітної обстановки в даній точці мережі є визначенням кількісних характеристик тривалих і імпульсних перешкод, характерних для даної ділянки мережі. До тривалих перешкод відносять відхилення напруги від номінального значення тривалістю більш 5мс, перевищуючі допустимі межі зміни у бік збільшення або зменшення. До імпульсних перешкод відносять імпульси напруги різної полярності, що накладаються на нормальний рівень миттєвого значення синусоїди або постійної напруги тривалістю від часток наносекунд до одиниць мілісекунд. До перешкод також слід віднести провали напруги, викликані, наприклад, спрацьовуванням автоматичного повторного включення або автоматичного включення резерву. Враховуючи максимально можливі затяжні пуски потужних двигунів, можна припустити, що найтриваліші перешкоди лежать в межах 10с. До розряду перешкод не відноситимуться тільки відключення (аварійні або робочі), пов'язані з подальшим ручним включенням напруги. По характеру протікання процесу в часі розрізняють перешкоди одиночні, періодичні, гармонійні і шуми. Одиночні перешкоди викликані комутацією мереж і електроприймачів, короткими замиканнями, статичними або атмосферними розрядами або іншими процесами, що викликають короткочасні незалежні один від одного збурення струму і напруги в мережі. Періодичні перешкоди пов'язані в основному з імпульсно-циклічним характером навантаження потужних електроприймачів. Гармонійні перешкоди (вищі гармоніки) виникають з частотою мережі або кратної їй і викликаються в основному потужними нелінійними електроспоживачами при обмеженій потужності живлячої мережі. Гармонійні і періодичні перешкоди, як правило, приводять до виникнення несинусоїдальності напруги.

Причини виникнення вищих гармонік на різних ділянках мережі також різні. Якщо у високовольтних мережах поява вищих гармонік обумовлена разом з дією

потужних нелінійних електроприймачів коронними розрядами, грозовими явищами і аварійними режимами ЛЕП, то в низьковольтних мережах вони обумовлені переважно нестаціонарними процесами і нелінійними характеристиками окремих електроприймачів. При цьому вищі гармоніки, що викликаються нелінійними споживачами, відповідно до приведеної вище класифікації назвемо систематичними, гармонійними, кондуктивними перешкодами.

Очевидно, що причиною порушення ЕМС може бути неприпустиме погіршення будь-якого з параметрів ЯЕ, викликане властивостями одного із споживачів або їх групи при сумісній експлуатації. Звичайно ЯЕ погіршує кожний із споживачів і, при деякій їх кількості, таке погіршення досягає граничного значення, що викликає збої і відмови апаратури. В цьому випадку конкретного винуватця просто не існує. При цьому складно привести приклад електроприймача, що є по відношенню до мережі чисто активним навантаженням. Навіть звичайна лампа розжарювання за рахунок різниці опору холодної і нагрітої нитки розжарення створює при включенні помітні перевантаження. Значно простіше привести приклади явно спотворюючи мережеву напругу електроприймачів, таких як зварювальні апарати, керований електропривод, комп'ютерна та інша електронна техніка. Значна частина цих споживачів генерує в мережу вищі гармоніки, серйозним чином загострюючи ситуацію з ЯЕ в низьковольтних мережах. Тому в умовах насиченості вказаних мереж нелінійними електроспоживачами домінуючим чинником погіршення ЯЕ і порушення ЕМС стає несинусоїдальність струмів і напруг.

Проведений аналіз показує, що спотворення синусоїдальності кривих струмів, що викликаються такими електроприймачами, в мережах НН можуть бути вельми істотними. Так, наприклад, для тих, що входять швидкими темпами в побут СВЧ-печей, які зручні і енергоефективні (у зв'язку з короткочасністю роботи внаслідок швидкого досягнення необхідного теплового ефекту) характерні коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривій вхідного струму від 15% («Електроніка», СП23, ЗІЛ, 1300ВА) до 29% (Daewoo, MOD KOR-8167, 1350ВА). Ці показники самі по собі начебто і не викликають побоювання, до того ж відносні значення гармонік струму швидко спадають в залежності від порядкового номера: у першому випадку

$I_{(3)}^* = 13,5\%$, $I_{(5)}^* = 3,6\%$, $I_{(7)}^* = 2,7\%$ і т. д., а в другому - $I_{(3)}^* = 25,2\%$, $I_{(5)}^* = 11,2\%$, $I_{(7)}^* = 5,2\%$ і т. д. Проте включення цих печей в типових умовах призводить не тільки до зниження напруги живлячої мережі по величині на $2 \div 4\%$, але і, що значно серйозніше, до збільшення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої цієї напруги на $6 \div 18\%$.

Сучасні компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) через свою високу вартість використовуються, в першу чергу, в цілях демонстрації престижності і, лише у другу - як енергоефективні світильники, які відрізняються в 4-5 разів більшою світловіддачею і в 5-6 разів більшим терміном служби, ніж лампи розжарювання. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої живлячого струму (K_1) КЛЛ з електромагнітним баластом (ЕМБ) знаходиться, на тому ж рівні, що і в СВЧ-печах: для лампи Life Look 50 фірми NEC (Японія) - $13,1\%$ (тут і далі враховуються гармонік по 13-ту включно), для лампи Globolux 125 фірми TUNGSRAM (Австрія) - $18,5\%$. Це підтверджують і проведені нами дослідження: для лампи NLS-18W (P) фірми RADIUM (Німеччина) $K_1 = 25,4\%$, для лампи ЛЕЦ-20. (Україна) $K_1 = 12,2\%$.

Бажання позбавитися природних недоліків КЛЛ з ЕМБ (порівняльно велика маса; низький $\cos\varphi$; висока напруга запалення, що може не дозволити їм взагалі запалитися при зниженні живлячої напруги нижче 190-220 В; тривалий час запуску) став причиною розробки і впровадження електронної пускорегулюючої апаратури (ЕПРА). Проте позбавлення від вказаних недоліків в таких джерелах було досягнуте ціною різкого погіршення форми кривої споживаного струму. Для лампи PLC Elektronіc фірми Philips (Голландія) $K_1 = 134,9\%$, для лампи Dulux Elektronіc фірми OSRAM (Німеччина) $K_1 = 162,4\%$, для лампи GP-12B фірми ECONOLAMP (Гонконг) $K_1 = 169,4\%$. Необхідно відзначити надзвичайно широкий спектр гармонік струму, який споживає КЛЛ з ЕПРА, і те, що зниження амплітуди гармонік при збільшенні їх номера відбувається вельми поволі (наприклад, для останньої із згаданих ламп $I_{(3)}^* = 92,6\%$, $I_{(5)}^* = 85,1\%$, $I_{(7)}^* = 74,7\%$, $I_{(9)}^* = 61,7\%$, $I_{(11)}^* = 48,2\%$, $I_{(13)}^* = 34,2\%$. Із зміною величини живлячої напруги форма струму і його гармонійний склад змінюються мало. Так, для лампи FLE 16 TBX/827/LC фірми TUNGSRAM при 220В $K_1 = 150,5\%$,

а при 180В $K_1 = 152\%$. Проте через наявність внутрішньої системи стабілізації, яка по суті підтримує незмінною величину світлового потоку, при цьому різко (приблизно у півтора рази) зростає абсолютні значення струмів споживання першої і всіх вищих гармонік.

Слід зазначити, що темпи виробництва КЛЛ з ЕПРА з кожним роком зростають. Якщо орієнтуватися на прогноз про можливу заміну 50% ламп розжарювання КЛЛ, то можна чекати подальшого істотного погіршення ситуації з несинусоїдальністю напруг в мережах НН, адже на освітлення в 1994г. в Україні витрачалося близько 17% всієї виробленої електроенергії.

Проведений аналіз показує, що основними джерелами вищих гармонік в мережах НН є споживачі енергії, що мають в своєму складі випрямляч з могутнім фільтром місткості. Це так звані перетворювачі з безтрансформаторним входом або, по міжнародній термінології, AC/DC Switch Mode Power Supply (SMPS) [12], які реалізують ту ж ідеологію, що і ЕПРА. В даний час це найсерйозніша проблема, яка породжена розвитком електроніки і посилюється у міру розширення масштабів її використання.

У 70-ті роки досягнення у області електрофізики і технології виробництва високочастотних напівпровідникових приладів дозволили підвищити їх робочі напруги до 200-600 В при струмах 10-20 А. Це визначило актуальність робіт із створення мережених джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ) з безтрансформаторним входом, в яких перетворення параметрів електроенергії виробляється на високій частоті (10-20 кГц), а фільтрація і стабілізація напруги здійснювалася за рахунок високочастотної імпульсної модуляції. Подібні роботи проводилися практично у всіх розвинених країнах і привели до підвищення ККД пристроїв електроживлення до $0,75 \div 0,9$ при збільшенні питомої вихідної потужності до 100 Вт/дм^3 . У середині 80-х років накопичений досвід проектування і експлуатації систем електроживлення з широким застосуванням ДВЕЖ з без трансформаторним входом дозволив виявити їх деякі негативні властивості, в першу чергу, що стосуються істотних спотворень синусоїдальності кривих вхідних струмів [2].

Зокрема, трифазні навантаження цього типу (частотно керовані

електроприводи, різні інвертування, зокрема, зварювальні випрямлячі інверторного типу) генерують потужні 5-у і 7-у гармоніки (до $70\div 80\%$ від амплітуди основної гармоніки кожна). При цьому форма споживаного струму сильно спотворюється і коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривих струму K_1 - $80\div 90\%$. Такі однофазні випрямні навантаження завдяки своїй масовості (комп'ютери, монітори, сервери, телевізори, телекомунікаційна і медична апаратура, і т. п.) також вносять свій істотний внесок в погіршення ЯЕ, генеруючи в мережу 3-ю і кратні їй гармоніки струму і доводячи загальний K_1 до $120\div 150\%$. Наприклад, відносні значення амплітуд гармонік вхідного струму комп'ютера по 13-у включно, відповідно до яких K_1 - 146% .

Таким чином, розглянуті споживачі по відношенню до живлячої мережі є істотно нелінійним навантаженням. При цьому обмежений магнітний зв'язок між первинною і вторинною обмотками розподільного трансформатора перешкоджає розповсюдженню вищих гармонік у високовольтну живлячу мережу, і вони в основному циркулюють в низьковольтній мережі. Проблема посилюється тим, що за рахунок подовжнього активно-індуктивного опору мережі несинусоїдальний характер кривої вхідного струму вказаних електроприймачів викликає спотворення живлячої напруги, які є чинником порушення ЕМС в мережах НН.

Відомо, що переважна більшість електроприймачів, що підключаються до мереж НН, є однофазними і має випадкові графіки навантажень. Внаслідок цього у будь-який момент часу в мережі має місце несиметрія навантажень по фазах і відповідна несиметрія струмів. При цьому слід розрізняти несиметрію струмів, визначену нерівномірним підключенням електроприймачів по фазах (невипадкова несиметрія), і несиметрію, викликану випадковими обставинами (вірогідність несиметрії).

Проведені дослідження показують, що в низьковольтних електричних мережах в нормальному робочому режимі вірогідність і невідповідна несиметрія струмів є постійно діючими чинниками, а у разі підключення нелінійних електроприймачів має місце так звана несиметрія вищих гармонік. Відомо, що в симетричному режимі струми вищих гармонік $3k+1$ (k - будь-яке ціле число) мають прямий порядок

продовження фаз, струми вищих гармонік $3k+2$ - зворотний і $3k$ — нульовий порядок проходження фаз. Якщо система фазних струмів кожної з гармонік стає несиметричною по амплітуді і фазі і може бути розкладена в загальному випадку на симетричні складові всіх трьох послідовностей, вважатимемо, що є несиметрія вищих гармонік струму. Тоді при розкладанні несиметричних гармонік наявність зворотної і нульової послідовностей характеризуватиме несиметрію гармонік $3k+1$, наявність прямої і нульової – несиметрію гармонік $3k+2$, а прямої і зворотної – несиметрію гармонік, кратних трьом.

Слід зазначити, що питанням несиметрії нелінійних навантажень присвячений ряд публікацій. У роботах, зокрема, показано, що складні форми кривих фазних струмів нелінійних споживачів рідко мають однакову конфігурацію в кожній з трьох фаз. При цьому система живлення може мати різні фазні опори і навіть різну схему на кожній фазі. В першу чергу це відноситься до засобів перетворюючої техніки, які відрізняються один від одного потужністю, числом фаз, розміщенням, схемою з'єднання, умовами роботи і ін. З одного боку, в результаті їх змішаних і підсумовують дій величини вищих гармонік в мережі істотно відрізняються від теоретичних прогнозів. З другого боку, внаслідок несиметрії навантажень, різних затримок в роботі окремих фаз випрямляча, розбіжності в значеннях коефіцієнта трансформації і т.д. не зникають ті гармонійні складові, які відповідно до теорії повинні бути відсутнім.

Неважко зрозуміти, що виникаюча несиметрія вищих гармонік є порушенням ЯЕ в результаті сумісної дії несиметрії і несинусоїдальності струмів відповідних навантажень. Тому в СЕ необхідно виконувати різного роду заходи щодо усунення, а якщо це не вдалося зробити, то по обмеженню несиметрії вищих гармонік. Наприклад, свого часу Австралійський стандарт AS 2279- 1979 на вміст вищих гармонік в мережі навіть пропонував ввести обмеження на використання однонапівперіодичного і так званого напівкерованого обладнання, яке внаслідок сумісного застосування діодів і тиристорів створює несиметричну ситуацію в мережі. Можна припустити, що якщо нести мережу вищих гармонік не можна усунути організаційними заходами, то необхідні технічні засоби зменшення вищих

гармонійних фазних струмів в умовах їх несиметрії.

В даний час спостерігається, що почався ще в 90-го роки минулого сторіччя зростання електроспоживання комунально-побутовим господарством і населенням України. Це пояснюється, з одного боку, спадом енергоспоживання промисловими галузями національної економіки, а з іншого – значним зростанням використання різноманітних електропобутових приладів, дуже часто досить великої одиничної потужності. Окрім цього, останніми роками відбувається бурхливе зростання кількості управлінських структур, банків і фінансових організацій, учбових центрів, видавничих фірм і т.д., які надзвичайно насичені різноманітною оргтехнікою (численні персональні комп'ютери і комп'ютерні мережі, розмножувальна і контрольна техніка, засоби персонального зв'язку). При цьому названі споживачі підключаються, як правило, до електричної мережі НН відповідної будівлі або споруди. Як було відмічено, характер їх електроспоживання в значній мірі визначається наявністю ДВЕЖ з безтрансформаторним входом, як вхідна ланка якого використовується мережевий випрямляч з фільтром місткості.

Таким чином, в даний час в низьковольтних мережах житлових і громадських будівель набули широке поширення нелінійні електроприймачі порівняно невеликої потужності, причому існує тенденція до безперервного збільшення їх кількості. Не дивлячись на малу потужність цих споживачів електроенергії, їх масове застосування є причиною значних спотворень синусоїдальності кривих напруг в мережах НН.

1.2. Вплив вищих гармонік на різні види електроустаткування розподільних мереж

Негативні наслідки завантаження мереж вищими гармоніками добре вивчені, цьому питанню присвячена обширна література. Вплив несинусоїдальності напруг і струмів на роботу електроустаткування відчувається практично у всіх країнах з розвинутою промисловістю і, як правило, призводить, з одного боку, до збільшення

втрат напруги і потужності в мережах, зменшенню їх пропускної спроможності, а з іншою – до порушення нормальної роботи і зменшення терміну служби електроустаткування, зниженню продуктивності праці, а також кількості і якості продукції, що випускається. Наприклад, відомо, що при допустимих значеннях несиметрій напруги 2% і несинусоїдальності 5% термін служби асинхронних двигунів скорочується на 21%, синхронних – на 32%, трансформаторів – на 8%, конденсаторів – на 40%.

При розгляді питання спотворення форми кривої струму і напруги мережі НН слід враховувати деякі особливості її побудови. До них, зокрема, відноситься те, що переважна більшість споживачів такої мережі, у тому числі і нелінійних, однофазна (див. підрозділ 1.1), а мережа виконується трифазною з нульовим проводом. В результаті в нульовому дроті протікатимуть струми всіх вищих гармонік нульової послідовності. При цьому виникає проблема перевантаження нульового дроту в чотирипровідних мережах НН, викликана нерівномірним завантаженням фазних дротів при підключенні до них однофазних нелінійних споживачів. Іноді величина сумарного діючого значення струму в нульовому дроті може навіть перевершувати величину струму у фазному дроті. Проведений в роботі аналіз свідчить, що теоретично максимальний струм нейтралі з урахуванням гармонік в 1,73, а іноді і в 3 рази перевищує фазний. При різко змінному навантаженні пульсації струму спостерігаються в кожній з фаз в різний час. Оскільки всі ці струми протікають в нейтралі, про взаємну компенсацію мови бути не може. У випадку, якщо піки навантаження не перетинаються, струм нейтралі буде рівний потрібному фазному струму. Ця ситуація досить типова для мереж з великою питомою вагою електронного обладнання.

Необхідно відзначити деякі конструктивні особливості виконання мереж НН, що роблять істотний вплив на величини вищих гармонік струмів і напруг. По сталій практиці проектування найширше розповсюдження в мережах НН розповсюдження в мережах НН отримали розподільні трансформатори із з'єднанням обмоток схеми зірка – зірка з нулем. Основний недолік таких трансформаторів – відносний великий

опір нульової послідовності Z_o^0 , яке визначається конструктивними особливостями трансформатора, схемою з'єднання його обмоток, ступенем насичення стрижнів магнітопровода і ін. Слід зазначити, що питанням визначення активного R_o^0 , індуктивного X_o^0 і повного Z_o^0 опорів трансформатора присвячений ряд робіт. При визначенні цих параметрів різними авторами використовувалися різні методики, внаслідок чого результати значно відрізняються між собою. Провівши аналіз останніх можна зробити висновок, що для трансформаторів типу ТМ, ТМА, ТСМА Z_o^0 в 8÷18 разів більше, ніж опір прямої послідовності. Така особливість трансформаторів із з'єднанням обмоток зірка – зірка з нулем робить їх вельми чутливими до несинусоїдальності фазних струмів [5].

Необхідно вказати на деякі особливості виконання повітряних і кабельних ліній мереж НН. Це перш за все те, що перетин нульового дроту повітряної лінії в 3÷9 разів менше сумарного перетину фазних дротів, а перетин нульової жили кабелю в 5÷14 раз менше сумарного перетину фазних жил. В результаті опір нульової послідовності повітряної лінії в 4÷10 разів, а кабельної – в 6÷15 разів вище, ніж опір зворотної послідовності. Крім того характерною особливістю мереж НН є те, що активні складові повних опорів трансформаторів і ліній вельми значні. Це викликає необхідність обліку останніх при розрахунках режимів і проектуванні електроустаткування, у тому числі і фільтрів, в мережах НН.

Таким чином, в мережах НН виникає значна несинусоїдальність фазних напруг, обумовлена істотними струмами вищих гармонік і великими опорами нульової послідовності елементів трифазних чотирипровідних мереж. В результаті в низьковольтних мережах України коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривій напруги K_U рідко буває менше величини 4÷5%. На заході, де мережі більш потужні, і те пропонується при розрахунках функціонування електроустаткування орієнтуватися на так звані джерела живлення типу SP2, що мають спочатку 1% несиметрії і 2,5% заздалегідь присутньої 5-й гармоніки напруги. Виникаючі спотворення живлячої напруги, у свою чергу, негативно позначаються на функціонуванні електроприймачів, що підключаються до вузлів з підвищеним

рівнем K_U , замикаючи порочне коло негативного взаємовпливу гармонік струму і напруги в мережах з нелінійними навантаженнями, тобто, порушення ЕМС.

У огляді, виконаному в 1990 р. в США під керівництвом професора Мак-Греді, зокрема, наголошується: "Самі джерела вищих гармонік часто дуже чутливі до негативної дії інших джерел, наприклад, потужних електронних навантажень, тобто, вони – одночасно і лиходії, і жертви з енергетичної точки зору". Повною мірою це відноситься до низьковольтних нелінійних електроприймачів, які були розглянуті в попередньому підрозділі. Наслідком характеру струму, споживаного імпульсним навантаженням, є спотворення кривої напруги на її затисках. Форма напруги стає плоскою, так у момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на подовжньому опорі мережі.

Напруга плоскої форми, впливаючи на імпульсне джерело живлення, знижує рівень випрямленої напруги, збільшує тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення і знижує його стійкість до короткочасних провалів напруги. Слід зазначити, що в більшості імпульсних джерел живлення передбачена система стабілізації вихідної напруги. Тому зниження рівня вхідної напруги в допустимих межах за рахунок плоскої форми його кривої не викличе зниження рівня вихідної постійної напруги. У той же час зниження вхідної напруги викличе збільшення тривалості імпульсів струму високочастотного перетворювача по відношенню до тривалості пауз. Це означає збільшення струму, споживаного високочастотним перетворювачем, в середньому за період і збільшення швидкості розряду конденсатора. Більший струм, споживаний високочастотним перетворювачем, збільшує теплові втрати в елементах імпульсного джерела живлення. Так, зниження вхідної напруги на 10% викличе збільшення струму на 11%, а теплових втрат – на 23%.

У разі провалу або навіть повного зникнення напруги на затисках імпульсного джерела живлення ланцюга постійного струму можуть продовжувати свою нормальну роботу протягом деякого, дуже короткого проміжку часу. Енергія, необхідна для роботи протягом цього проміжку часу, – це енергія згладжуючого конденсатора. Не дивлячись на те, що цей конденсатор володіє вельми великою

місткістю, що запасасться їм енергія залежить ще і від напруги, до якого він був спочатку заряджений. При синусоїдальній формі кривої живлячої напруги конденсатор може заряджати до напруги більшої, ніж при плоскій формі живлячої напруги. У другому випадку накопиченої в конденсаторі енергії може не вистачити для підтримки нормальної роботи ланцюгів постійного струму до моменту відновлення живлячої напруги при його короткочасному провалі або зникненні.

За даними роботи у випадках, коли потужність нелінійних електроспоживачів не перевищує $10\div 15\%$ сумарної потужності навантаження мережі, яких-небудь особливостей в експлуатації СЕ, як правило, не виникає. При перевищенні вказаної межі слід чекати появи різних проблем в експлуатації і наслідків, причини яких не є очевидними. У низьковольтних мережах, що мають частку нелінійного навантаження понад 25%, окремі проблеми можуть виявитися відразу.

В результаті вищі гармонік приводять до відмов систем управління і автоматики, а також до збою комп'ютерних мереж і цифрових систем обробки і передачі інформації, що приносить найбільший збиток. Крім того, гармонійні складові є причиною порушень телевізійних зображень, викликають порушення в роботі люмінесцентних ламп і скорочують термін служби ламп розжарювання. Останнім часом відмічений негативний вплив вищих гармонік на різні побутові прилади, перш за все радіоприймачі і пристрої з високоякісним відтворенням звуку, що викликають різного роду акустичні перешкоди.

Слід особливо відзначити, що навіть низькі рівні вищих гармонік можуть викликати порушення режимів роботи у деяких видів контрольного, захисного і вимірювального обладнання через спотворення форми кривої вимірюваних напруг і струмів на вторинних обмотках вимірювальних трансформаторів. В результаті, зокрема, вищі гармоніки приводять до виникнення помилкових спрацьовувань захисних реле на трансформаторних підстанціях.

Гармоніки, що генеруються нелінійним навантаженням, створюють додаткові втрати в розподільних трансформаторах і трансформаторах для пристроїв перетворювальної техніки. Ці втрати можуть бути причиною виходу з ладу трансформаторів внаслідок перегріву. Зокрема, втрати, обумовлені гістерезисом,

пропорційні частоті, а вихровими струмами – її квадрату. У синусоїдальних режимах втрати на вихрові струми невеликі і складають в середньому 5% від номінальних втрат короткого замикання трансформатора. Проте, вразі протікання струмів вищих гармонік додаткові втрати різко зростають і можуть досягати 30-50% втрат короткого замикання.

У роботі показано, що втрати в трансформаторі зростають із збільшенням потужності трансформатора і збільшення перетину провідників обмоток. При цьому істотне зростання втрат спостерігається при роботі трансформатора на випадкове нелінійне навантаження за наявності нульового дроту, завантаженого струмами гармоніку нульової послідовності. В результаті, при роботі трансформатора на симетричні однофазні випрямлячі втрати більше, ніж при роботі цього ж трансформатора на схему Ларіонова. Це пов'язано з наявністю в першому випадку гармонік струму, кратних трьом, які збільшують втрати в обмотках трансформатора.

В умовах несинусоїдальності струму погіршуються умови роботи батарей конденсаторів, які призначені для компенсації реактивної потужності навантаження. При цьому вони змінюють нормальний шлях протікання струму вищих гармонік від нелінійного споживача до джерела живлення, замикаючи частину цього струму через себе. Оскільки опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при застосуванні установок компенсації реактивної потужності і наявності нелінійних електроспоживачів виникає вірогідність появи резонансних режимів (як по струму, так і по напрузі) на окремих елементах СЕ.

Дія вищих гармонік на машини, що обертаються, багато в чому ідентична дії несиметрії напруг і струмів. Вони викликають додаткові втрати в обмотці і сталі статора. Крім того, присутність в кривій струму статора вищих гармонік призводить до появи в зазорі несинхронних магнітних полів, що переміщаються щодо ротора. При цьому вищі гармоніки 6-го і 11-го порядків створюють поля зворотної послідовності, що обертаються по відношенню до ротора в протилежному напрямі, а складові 7-го і 13-го порядків створюють поля прямої послідовності. Проте оскільки частота їх обертання вища за частоту обертання ротора з кратністю порядку гармоніки, поля обох послідовностей наводять в контурах ротора струми підвищеної

частоти, які протікають у верхніх шарах масивних частин ротора і, замикаючись по його торцях, викликають місцеві перегріву.

При несинусоїдальності напруги спостерігається прискорене старіння ізоляції електричних машин, трансформаторів, конденсаторів і кабелів. При робочих температурах в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, що приводять до поступової зміни їх ізоляційних і механічних властивостей. Із зростанням температури ці процеси швидшають, скорочуючи термін служби обладнання. У конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті, тому несинусоїдальний струм призводить до їх перегріву. Суть електричного старіння полягає у виникненні так званих часткових розрядів, які розповсюджуються лише на частину ізоляційного проміжку, наприклад, часткові розряди в газових включеннях. Часткові розряди пов'язані з розсіянням енергії, наслідком якого є електрична, механічна і хімічна дії на навколишній діелектрик. В результаті розвиваються місцеві дефекти ізоляції, що призводить до скорочення її терміну служби.

Старіння ізоляції провідників і кабелів обумовлене протіканням несинусоїдального струму, що призводить до підвищеного нагріву зовнішньої поверхні жил кабелю внаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості. Дослідження показали, що при коефіцієнті спотворення синусоїдальності кривої напруги в межах $6 \div 8,5\%$ (переважали 5-а і 7-а гармоніки) струми витoku зросли: через 2,5 роки експлуатації кабелів в середньому на 36, а через 3,5 роки – на 43%. Ілюстрацією скорочення терміну служби ізоляції електродвигунів може слугувати приклад, запозичений з січневого номера журналу IEEE Power Engineering Review за 2000 рік. В даний час в США встановлено більше 700 млн. електродвигунів. При середньому терміні служби двигуна 30 років потрібна заміна двигунів в об'ємі 23 млн. одиниць в рік. При існуючій ЯЕ спостерігається скорочення терміну служби двигуна на 2 роки, що призводить до необхідності додаткової заміни трьох млн. двигунів в рік.

Крім того, при несинусоїдальних режимах зростає рівень додаткових втрат активної потужності, які, будучи частиною непродуктивних втрат в лініях, викликані перетіканнями потужності спотворення, обумовленої вищими

гармоніками. Проведені в 90-х роках розрахунки показали, що в мережах НН 40% загального об'єму втрат обумовлені відхиленнями напруг, 40% – несинусоїдальністю напруг і 20% – несиметрією напруг.

У низьковольтних мережах іноді відбувається необґрунтоване спрацьовування запобіжників і автоматичних вимикачів внаслідок додаткового нагріву внутрішніх елементів захисних пристроїв. Цей процес обумовлений протіканням несинусоїдальних струмів і, отже, дією поверхневого ефекту і ефекту близькості. У практиці досліджень зустрічалися випадки необґрунтованих спрацьовувань вибраних відповідно до вимог ПУЕ автоматичних вимикачів, що захищають лінії живлення комп'ютерного обладнання. Спрацьовування відбувалося при навантаженні, що становить $80\div 85\%$ втоми теплового розчіплювача автоматичного вимикача.

В той же час згідно ПУЕ нульовий провід не захищається від перегріву автоматичними вимикачами або запобіжниками. Існуючі СЕ проектувалися з врахуванням лінійного навантаження, коли споживаний електроприймачами струм містив лише основну гармоніку (50 Гц). Отже, струм в нульовому дроті не міг перевершувати струм в найбільш навантаженій фазі, тобто захист на фазних дротах одночасно захищав від перегріву і нульовий провід. Сьогодні, коли струми в нульових дротах перевершують струми фазних дротів, а захист від струмових перевантажень в ланцюгах нульових дротів не передбачений, можливий перегрів і руйнування нульових дротів кабельних ліній внаслідок їх перевантаження струмами нульової послідовності.

Перешкоди в мережах телекомунікацій можуть виникати там, де силові кабелі і кабелі телекомунікацій розташовані відносно близько. Внаслідок протікання в силових кабелях високочастотних гармонік струму, в кабелях телекомунікацій можуть наводитися перешкоди. Магнітні поля струмів вищих гармонік прямої і зворотної послідовності частково компенсують один одного, тому найбільший вплив на телекомунікації роблять гармоніки, кратні трьом. Чим вище порядок гармонік, тим більше рівень перешкод, наведених ними в телекомунікаційних кабелях.

Таким чином, використання в низьковольтних електричних мережах нелінійних електроприймачів (в першу чергу, з імпульсним характером споживаного струму), викликаючи спотворення синусоїдальності кривих живлячих напруг, призводить до значного техніко-економічного збитку. Протягом 2000 – 2002 рр. Центр електромагнітної безпеки досліджував стан електричних мереж найбільших будівель, що мають комп'ютерні мережі з кількістю комп'ютерів від 20 до 1000 і більше. В результаті проведених досліджень, аналізу вітчизняних і зарубіжних публікацій, а також спілкування з фахівцями в цій області автори дійшли висновку, що росія зіткнулася з новою серйозною проблемою. Її суть полягає у тому, що в даний час електричні мережі житлових і громадських будівель, оснащених комп'ютерною технікою, піддаються інтенсивній дії вищих гармонік струму і напруги. Очевидно, що аналогічна ситуація існує і в Україні, що викликає гостру необхідність в поліпшенні ЯЕ і забезпеченні ЕМС споживачів вказаних низьковольтних мереж.

1.3. Оцінювання електромагнітної сумісності в розподільних мережах

Електромагнітна сумісність електроустаткування в конкретній мережі є результатом оптимізації ЯЕ в цій мережі. Тобто, якість електроенергії визначається сукупністю стандартних показників, які характеризують режим роботи електричної мережі з точки зору загальнішого поняття електромагнітної сумісності споживачів електроенергії. Задачі оптимізації показників якості електроенергії (ПЯЕ) багато авторів вирішували що до широкого розповсюдження поняття ЕМС. Наприклад, наголошувалося, що різні ПЯЕ впливають на різні електроустановки по-різному. Тому при контролі ПЯЕ для отримання повної картини впливу спотворень повинні вимірюватися всі показники. Для спрощення контролю пропонувалося вимірювати і контролювати не всі показники окремо, а один загальний критерій якості «загальне спотворення трифазних напруг I ». Він чисельно рівний відношенню діючої напруги всіх спотворюючих чинників до номінального значення напруги трифазної мережі.

Таким чином, автор припускав одержати повну інформацію про ЯЕ в конкретній мережі і оптимізувати його інтегральний, а не за окремими показниками. Введення загального критерію якості «І» було одним з перших кроків на шляху до оцінки ЕМС електроустаткування.

У роботах приведені аналітичні вирази для визначення додаткових втрат потужності і зниження терміну служби основного електроустаткування енергосистем (машини, що обертаються, трансформатори, батареї конденсаторів, лінії електропередачі) у функції окремих ПЯЕ. Тут же для визначення кратності зниження терміну служби вказаного обладнання вводиться поняття коефіцієнта, спотворення як функції окремих ПЯЕ. У роботі пропонується оцінку впливу перешкод на електроустаткування підприємств виконувати по сумісній дії несиметрії і несинусоїдальності, виходячи з умови підсумовування температур додаткових перегрівів від вказаних перешкод.

Вводиться узагальнений показник несинусоїдальності, який є економічно обґрунтованим з погляду збитку від вищих гармонік. При цьому розглядаються наступні складові збитку: скорочення терміну служби обладнання внаслідок прискореного старіння ізоляції, вартість ремонту кабельних мереж внаслідок підвищеної аварійності і додаткові активні втрати в електричних мережах. Причому в цьому випадку відсутні порушення нормальної роботи електроприймачів (пошкодження обладнання, збої в роботі чутливого обладнання і т. ін.). Узагальнений показник розраховується для конкретної СЕ різних галузей народного господарства. Таким чином, запропонований показник дозволяє оцінити ЯЕ в конкретній мережі в тому випадку, якщо немає порушень нормальної роботи електроприймачів.

Проте в умовах конкретної мережі, навантаження можуть виявитися несумісними в електромагнітному відношенні навіть при мінімальних значеннях несинусоїдальності або несиметрії напруги. Тобто при проектуванні сучасних СЕ необхідно не тільки витримувати всі нормативні вимоги до ЯЕ, але і враховувати ЕМС різних приймачів електроенергії і вплив на неї параметрів самій СЕ. Так збиток від порушення ПЯЕ в конкретній мережі розраховується вже з урахуванням чинника

ЕМС, і лише при цій умові функція збитку мінімізується. Якщо одержаний економічно обґрунтований оптимум величини ПЯЕ, але при цьому не врахована ЕМС електроприймачів, то говорити про рішення задачі оптимізації ЯЕ не представляється можливим.

В даний час існує потреба в оцінці і нормуванні ЕМС конкретних видів електроустаткування – джерел електромагнітних перешкод і пристроїв, схильних до їх впливу. Кажучи про нормування, слід пам'ятати, що питання впливу вищих гармонік на обладнання традиційно розглядалося в рамках проблеми ЯЕ. Тому система показників і норм, що характеризують електромагнітну обстановку в мережі, при яких повинне забезпечуватися нормальне функціонування електроустаткування, була встановлена ГОСТ 13109-67. Аналіз цього стандарту виявив ряд істотних недоліків, що утрудняють забезпечення ЕМС обладнання, в особливості електронного, з мережею живлення, подолання яких сприяло внесення в нову редакцію стандарту - ГОСТ 13109-87 – змін. Були введені нові ПЯЕ, зокрема коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги; нормовані погрішності вимірювання ПЯЕ і встановлений єдиний період вимірювання при зіставленні з нормою. Проте ці і інші зміни не виключали повністю всіх недоліків колишнього стандарту. Головне те, що ці норми як і раніше у багатьох випадках не відображали вимог до забезпечення ЕМС. У діючому сьогодні стандарті чітко встановлено, що проблема ЯЕ є складовою частиною загальної проблеми ЕМС між СЕ загального призначення і СЕ споживачів електричної енергії. Це знайшло віддзеркалення в найменуванні стандарту, яке сформульоване таким чином: «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», і в дуже важливому положенні про те, що «норми ЯЕ, встановлювані справжнім стандартом, є рівнями електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних перешкод», передаваних по електричних мережах. Крім того, в ГОСТ 13109-97 підкреслений взаємозв'язок між нормами стандарту, рівнями перешкодостійкості приймачів електричної енергії і рівнями кондуктивних електромагнітних перешкод, що вносяться цими приймачами.

Міждержавний і національний стандарти встановлюють норми допустимих значень електромагнітних перешкод в мережах, а також дають визначення близько 160 термінів, що відносяться до проблеми. Так, згідно ГОСТ 13109-97 нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривій напруги (колишнє найменування «коефіцієнт несинусоїдальності») в мережах з напругою 0,38 кВ встановлені 8 і 12% відповідно.

Слід зазначити, що встановлені в ГОСТ 13109-97 нормально і гранично допустимі значення для окремих гармонійних складових напруги в електричних мережах напругою 0,38 кВ співпадають з відповідними рівнями ЕМС, встановленими в стандарті Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) ІЕС 1000-2-2. За інформацією, що є у нас, в російській федерації в 2001-2002 рр. повинна була бути введена серія Державних стандартів-аналогів стандартів МЕК серії 1000 (сумісність технічних засобів електромагнітна). Норми Національних стандартів багатьох європейських країн (Данія, Норвегія, Чехія і ін.) в основному відповідають нормам стандартів МЕК. Хоча є виключення, наприклад, в Польщі норми встановлюють нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги 7 і 10% відповідно. У Швеції, вважаючи європейські стандарти недостатньо суворими, встановили гранично допустиме значення $K_U=6\%$.

Для порівняння вкажемо, що тривало допустимі значення аналогічного показника по ГОСТ 13109-67 були прийняті 5%. По ГОСТ 13109-87 максимальні допустимі значення вказаного коефіцієнта були підвищені і складали 10%. Очевидно, що і ті і інші допуски були істотно менше нині діючих нормативів, тобто не можна не відзначити чітко виражену негативну, на наш погляд, тенденцію до збільшення допустимих меж електромагнітних спотворень в частині форми кривої напруги. З урахуванням компромісу між інтересами постачальників електроенергії у вигляді електрозабезпечуючих компаній, досить засобів на розвиток мереж, і споживачів електроенергії, що не мають, працюючих в складних економічних умовах, можна зрозуміти вказану тенденцію, але схвалити її все ж таки важко.

Для того, щоб будь-який стандарт був ефективним необхідно, щоб

використовувані в ньому показники мали чіткий фізичний сенс, а методи їх визначення і нормування витікали з особливостей оцінки наслідків дії спотворень напруг на електроустаткування. Гранично допустимі або інші їх значення повинні бути встановлені на підставі техніко-економічних розрахунків або експертних оцінок. При цьому власне величини норм можуть бути різними, наприклад, в різних країнах і залежати від цілого ряду чинників.

Стандарти повинні надавати стимулюючу дію на розвиток техніки. Для цього вони повинні бути, з одного боку, «випереджаючими», створюючись на основі проведених науково-дослідних робіт. З другого боку, враховувати реальні, історично склалися особливості використовуваної існуючої електроустаткування, системоутворюючих і розподільних електричних мереж різних класів напруг діючих енергосистем і підприємств. Використовування «випереджаючих» стандартів стимулює розвиток принципово нового обладнання і поліпшення характеристик старого. Так, наприклад, ГОСТ 13109-87 до певної міри сприяв розвитку технічних засобів поліпшення ЯЕ, застосуванню багатофазних схем випрямлення змінного струму, розробці електротехнологічних установок з меншим ступенем негативної дії на живлячі мережі і ін. Широкому розвитку робіт із створення перетворювачів з поліпшеною ЕМС сприяло введення у ряді країн стандартів на якість споживаного від мережі струму. Так, в США діє стандарт IEEE 519, що розповсюджується на електричні системи, нелінійні споживачі, що містять. Подібні стандарти введені і в країнах Західної Європи:

- ІЕС 1000-3-2 нормує гармонійні спотворення струму, що поступають в мережі від споживачів із струмом до 16 А;
- ІЕС 1000-3-4 нормує гармонійні спотворення струму, що поступають в мережу від споживачів із струмом більше 16 А.

Допустимі значення амплітуд гармонік струму за стандартом IEEE 519 залежать від співвідношення струму короткого замикання у вузлі підключення споживача I_{SC} і струму основної гармоніки. Допустимі значення перших 27 непарних гармонік (у відсотках від основної) приведені в табл. 1.1 Парні гармоніки не повинні

перевищувати 25% від найближчої непарної.

Таблиця 1.1 – Допустимі значення струмів вищих гармонік відповідно до стандарту IEEE 519

Номер гармоніки	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
$20 < I_{SC}/I_L < 50$	7	7	7	7	3,5	3,5	3,5	2,5	2,5	2,5	1	1	1
$50 < I_{SC}/I_L < 100$	10	10	10	10	4,5	4,5	4,5	4	4	4	1,5	1,5	1,5
$100 < I_{SC}/I_L < 1000$	12	12	12	12	5,5	5,5	5,5	5	5	5	2	2	2
$I_{SC}/I_L > 1000$	15	15	15	15	7	7	7	6	6	6	2,5	2,5	2,5

У зв'язку з цим, обґрунтовується висновок про необхідність вдосконалення власної нормативно-правової бази електротехніки в частині нормування емісії гармонійних складових струму. У роботі також пропонується доповнити ГОСТ 13109-97 показниками несинусоїдальності електричного струму для контролю роботи споживача з метою виявлення емітентів погіршень ПЯЕ і використання економічних стимулів до поліпшення конкретних ситуацій в електромережах. На думку авторів, це дозволить привернути споживачів до відповідальності за емісію погіршень ПЯЕ. На жаль, справа гальмується через відсутність науково-методичної і нормативно-правової бази, яка дозволила б виявити конкретних емітентів погіршень ПЯЕ, визначила б їх економічну відповідальність і стимулювала б їх зацікавленість у виправленні ситуації. У мережах НН ситуація ще більше ускладнюється у зв'язку з тим, що низьковольтні споживачі дуже часто є одночасно винуватцями і жертвами погіршення ЕМС [6].

Рішення проблеми ЯЕ в цілому повинне ґрунтуватися на системному підході до неї. Його значення стосовно даної проблеми полягає у тому, що не можна вирішувати проблему ЯЕ поза взаємним зв'язком і залежністю параметрів ЕМС обладнання різних типів і електричних мереж. Електроустаткування повинна володіти такими параметрами ЕМС, щоб воно могло нормально виконувати властиві йому технічні функції в умовах існуючого ЯЕ в існуючих електричних мережах і не

погіршувати умови роботи інших видів електроустаткування і самих електричних мереж.

На жаль, в даний час дуже часто, коли говорять про поліпшення ЕМС нелінійного навантаження з мережею живлення, мають на увазі просте зниження рівня вищих гармонік в мережі. При цьому залишається не з'ясованою величина ПЯЕ, при якій дійсно досягається ЕМС конкретного обладнання. Наприклад, розглянуті заходи щодо зниження рівня вищих гармонік до меж, регламентованих ГОСТ 13109-87. Після досягнення шуканої величини ПЯЕ автори, не розглядаючи конкретне обладнання, збиток і т. ін., стверджують, що задача ЕМС вирішена. Очевидно, що коректність подібних висновків викликає певні сумніви.

У деяких роботах по теоретичній електротехніці, пропонується для оцінки ЕМС використовувати енергетичний показник – функцію миттєвої потужності $p(t)$. При цьому визначається залежність $p(t)$ від різних ПЯЕ. Знаючи допустимі діапазони зміни ПЯЕ, можна визначити допустимий діапазон зміни миттєвої потужності. На підставі аналізу набутих значень $p(t)$ робиться висновок про ЕМС мереж і споживача, виходячи з вимог до ПЯЕ згідно ГОСТ 13109-87. Неважко бачити, що цей показник не дозволяє однозначно оцінити ЕМС [4].

На підставі вище висловленого можна зробити наступні висновки. Для оцінки ЕМС електроустаткування і конкретної СЕ необхідно визначати і контролювати ПЯЕ в даній СЕ. Очевидно, що для кожного конкретного випадку СЕ, в якій є електроустаткування – джерело перешкод, мережу і електроустаткування, схильне до негативної дії цих перешкод, можна визначити конкретний збиток від порушення ЯЕ. При цьому легко знайти вигляд і величину збитку, який визначає порушення ЕМС в даному конкретному випадку. Значення ПЯЕ у момент вказаного порушення ЕМС (навіть при дотриманні вимог діючих стандартів) слід вважати нормою ЕМС для цього виду електроустаткування в даній СЕ. Наприклад, збільшення рівня вищих гармонік, що генеруються нелінійними споживачами, призводить в певний момент до збою в роботі комп'ютерної мережі. Величина коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги (струму), при якій відбувається збій, є чисто технічною межею, що визначає норму ЕМС конкретних електроспоживачів. Для

оцінки ЕМС на етапі проектування СЕ або під час її експлуатації навантаження слід досліджувати на точній математичній або фізичній моделі тієї мережі, до якої вони будуть підключені. Очевидно, що це також (як у разі рішення проблеми ЯЕ) реалізація системного підходу, при якому моделюються як електроприймачі, так і електромагнітне середовище. При цьому визначаються всі небажані наслідки роботи спотворюючого споживача. Якщо рівень електромагнітних перешкод, що генеруються, задовольняє як чутливе обладнання, так і персонал (який має право пред'явити претензії до незадовільного ЯЕ), то можна говорити про ЕМС даного обладнання. Інакше необхідно вирішувати проблему ЕМС, удосконалюючи всі елементи СЕ [3].

Наприклад, в роботі розглянута конкретна група електро побутових приладів. При цьому обумовлені види приладів, що входять до цієї групи, і особливості мережі, до якої вони будуть підключені. Окрім цього визначені допустимі рівні вищих гармонік, що генеруються даними електроприладами. Розглянута схема випробувань, що включає точну фізичну модель мережі. В результаті проведених досліджень одержують результати, на підставі яких пред'являються вимоги до даної групи електроприймачів з погляду їх ЕМС з мережею.

Слід зазначити, що електричну мережу з нелінійними навантаженнями можна розглянути як динамічну систему. Під динамічною системою, як відомо, розуміють процеси (об'єкти), поведінка яких підкоряється деякій системі інтегро-диференціальних і кінцевих рівнянь в звичайних і приватних похідних. Наявність інтегро-диференціальних рівнянь є характерною ознакою динамічності процесу. У роботі показано, що простою динамічною людино-машинною системою є система, в якій людині відведена роль спостерігача за поведінкою системи за допомогою простої системи контролю. Весь необхідний об'єм обробки інформації, одержаної системою контролю, покладається на мозок людини, який оцінює поточний стан об'єкту на основі власного досвіду або посадових інструкцій, ухвалює рішення по управлінню і реалізує це управління за допомогою наявних виконавчих механізмів.

Там же розглянутий різновид системи з елементами штучного інтелекту, в якій одночасно з об'єктом функціонує в тому ж масштабі часу його математична модель.

Це дозволяє оцінювати і формувати сигнали про змінні стану, які в об'єкті не можуть бути безпосередньо виміряні, або таке вимірювання з якої-небудь причини недоцільне. За останньою схемою структурної моделі будується більшість існуючих систем моніторингу. У разі електричних мереж з нелінійними споживачами модель повинна забезпечувати безперервну оцінку несинусоїдальності струмів і напруг, а також інформування про неприпустимі рівні вищих гармонік з метою проведення необхідних заходів щодо їх зниження.

Очевидно, що ускладнення математичних моделей за рахунок необхідності обліку нелінійності великої кількості електроприймачів мереж ІН обмежує можливості аналітичних методів. У зв'язку з цим, виникає необхідність застосування методів імітаційного моделювання режимів низьковольтних мереж з нелінійними споживачами. Вказані методи дозволяють здійснювати чисельні рішення поставлених задач і проводити перевірку різних способів і засобів забезпечення ЕМС у співставних умовах.

Таким чином, проблема ЕМС є проблемою сумісного функціонування різних електроспоживачів в конкретній СЕ. Для прогнозування і оцінки можливих наслідків зростання нелінійних навантажень, проведення робіт по діагностиці і аналізу СЕ, а також вироблення вимог до нелінійних електроприймачів, параметрам мережі і засобам забезпечення їх ЕМС необхідна розробка адекватних математичних і фізичних моделей електричних мереж з нелінійними навантаженнями [7].

Висновки по розділу 1

Показано, що в даний час в низьковольтних мережах житлових і громадських будівель набули широке поширення нелінійні електроприймачі порівняно невеликої потужності, причому існує тенденція до безперервного збільшення їх кількості. Не дивлячись на малу потужність цих споживачів електроенергії, їх масове застосування є причиною значних спотворень синусоїдальності кривих напруг в мережах НІ. Встановлено, що основними джерелами вищих гармонік в мережах НІ є перетворювачі з безтрансформаторним входом, як вхідна ланка яких

використовується мережевий випрямляч з фільтром місткості. В даний час це найсерйозніша проблема, яка породжена розвитком електроніки і посилюється у міру розширення масштабів її використання. Зроблений висновок, що в умовах насиченості вказаними нелінійними електроспоживачами несинусоїдальність струмів і напруг стає домінуючим чинником погіршення ЯЕ і порушення ЕМС в електричних мережах будівель і споруд.

Встановлено, що значна несинусоїдальність фазних напруг в мережах НН викликана не тільки істотними струмами вищих гармонік, але і великими опорами нульової послідовності елементів трифазних чотирипровідних мереж. Показано, що вплив несинусоїдальності напруг і струмів, як правило, призводить, з одного боку, до збільшення втрат напруги і потужності в низьковольтних електричних мереж, а з іншого – до порушення нормальної роботи і зменшення терміну служби електроустаткування, тобто значному техніко-економічному збитку. Визначено, що в даний час електричні мережі житлових і громадських будівель піддаються інтенсивній дії вищих гармонік струму і напруги, що в умовах широкомасштабного використання, в першу чергу, комп'ютерної техніки викликає гостру необхідність в поліпшенні ЯЕ і забезпеченні ЕМС споживачів вказаних низьковольтних мереж.

Проведений аналіз існуючих вітчизняних і зарубіжних стандартів у області ЯЕ і ЕМС і відмічена негативна тенденція до збільшенню допустимих меж ПЯЕ в частині несинусоїдальності напруги. Обґрунтований висновок про необхідність вдосконалення власної нормативно-правової бази електротехніків частині нормування емісії гармонійних складових струму для контролю роботи споживача з метою виявлення емітентів погіршень ПЯЕ. Окрім того нормування вищих гармонік струму повинне стимулювати створення принципово нового обладнання і поліпшення характеристик старого з метою забезпечення ЕМС. Визначено, що проблема ЕМС є проблемою сумісного функціонування різних електроспоживачів в конкретній СЕ.

2 МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ РЕЖИМІВ МЕРЕЖ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

2.1 Моделювання нелінійних навантажень

Адекватність моделювання режиму СЕ багато в чому визначається прийнятою моделлю навантаження. Моделюванню нелінійних навантажень присвячений ряд робіт вітчизняних і зарубіжних учених. Широко поширені моделі, в яких нелінійні навантаження визначаються або нелінійними вольт-амперними характеристиками, які апроксимуються різними функціями, або нелінійними опорами (провідностями), керованими напругами із заданими вольт-амперними характеристиками. Наприклад, аналізуються і синтезуються коректуючі пристрої для урівноваження режимів в ланцюгах з нелінійними навантаженнями, характеристики яких апроксимуються статичним поліномом. У роботі аналізуються нелінійні електричні ланцюги постійного і змінного струмів, в яких нелінійні залежності опору навантаження від струму або напруги апроксимуються, зокрема, укороченим поліномом другого ступеня. Математичні моделі нелінійних елементів у вигляді нелінійних провідностей із заданим законом зміни використані для розрахунку поточкорозподілу електроенергетичної системи. При цьому в одних випадках розглядається мережа нескінченної потужності, а в інших – враховуються параметри мережі. Проте описані в цих роботах моделі нелінійних навантажень непридатні для аналізу електромагнітних процесів в живлячій мережі. Відомо, що перетворююча техніка є головним джерелом вищих гармонік в сучасних СЕ. В даний час широко застосовуються моделі напівпровідникових перетворювачів (ПП), які дозволяють досліджувати і оптимізувати електромагнітні процеси, що протікають в їх силових ланцюгах. При цьому моделі і реалізуючі їх комплекси програм можуть бути як достатньо складними, так і простими (макромоделі) з погляду об'єму обчислень і витрат машинної пам'яті. Складні універсальні моделі вентильних перетворювачів дозволяють виробити аналіз сталих і перехідних процесів, обчислювати значення

струмів і напруг, встановлені потужності у всіх елементах ланцюга, досліджувати різні режими роботи (накид і скидання навантаження, коротке замикання і ін.), вибирати параметри і налаштовувати системи авторегулювання, проводити гармонійний аналіз струмів і напруг на елементах і т. ін.

Для проведення конкретних досліджень конкретного перетворювача використовують макромоделі напівпровідникових перетворювачів, тобто спрощені моделі, що дозволяють вирішити задачу при збереженні достатньої для практики точності моделювання. Однією з конкретних задач є гармонійний аналіз кривої вхідного струму перетворювача. Відомі моделі, що дозволяють визначити гармонійний зміст кривої вхідного струму, різних видів перетворювачів, зокрема випрямлячів. Перевагою подібних моделей є те, що величина вищих гармонік визначається залежно від параметрів конкретного перетворювача. Наприклад, найчастіше що зустрічаються 6-пульсні випрямні системи утворюють гармонійні складові кривої струму порядку $n=6(k+1)\pm 1$, де $k=0,1,2,3$. Причому питання про частку цих гармонійних складових в кривій струму, що живить випрямляч, є вельми складним, оскільки вона є функцією не тільки числа пульсацій, але і випрямленої напруги і параметрів ланцюга випрямляча. Окрім цього, такі макромоделі ПП дозволяють аналізувати електромагнітні процеси в їх силових ланцюгах [10].

Однієї з найпоширеніших багатофазних схем випрямлячів є трифазна мостова схема. Загальновідома і проблема погіршення ЯЕ, що виклакається несинусоїдальним характером струму, споживаного з мережі нелінійними навантаженнями типу трифазного випрямляча з фільтром місткості. Стосовно частотно регульованому асинхронному електроприводу ця проблема в широкому плані розглянута. У роботі приведені експериментальні і розрахункові характеристики фазних струмів згаданих випрямлячів. При цьому розрахунки проводилися за допомогою цифрової моделі засобами пакету програм Microsim Design Lab 8.0 (PSpice).

У роботі розглянута математична (аналітична) модель трифазних мостових випрямлячів із застосуванням комутаційних функцій. На рисунку. 2.1 представлена трифазна мостова схема випрямлення.

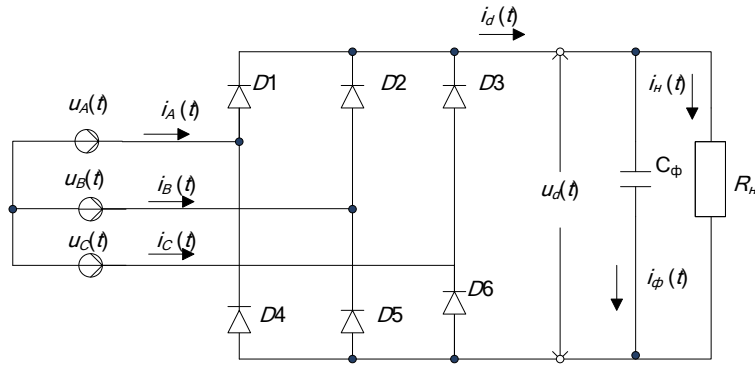


Рисунок. 2.1. – Трифазна мостова схема випрямляча з місткістним фільтром

Тут некерований випрямляч D1 D6 підключений до мережі з трифазною системою живлячих напруг $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$:

$$u_A(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t); u_B(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \quad (2.1)$$

$$u_C(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}),$$

де $\omega=314$ - кутова частота; t - час; $U=220$ В - діюче значення фазної напруги. Окрім цього на малюнку позначені C_{ϕ} - фільтруючий конденсатор; R_H - активне навантаження; $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ - миттєві значення струмів на вході випрямляча; $u_d(t)$, $i_d(t)$, - миттєві значення струмів, що протікають в місткості фільтру і навантаженні; $u_d(t)$, $i_d(t)$ - миттєві значення випрямлених напруги і струму на виході випрямляча.

Відомо, що математичний зв'язок між миттєвими значеннями вхідних і вихідних електричних величин вентильного комутатора виражається за допомогою комутаційних функцій таким чином:

$$u_d(t) = \rho_A(t) \times u_A(t) + \rho_B(t) \times u_B(t) + \rho_C(t) \times u_C(t); \quad (2.2)$$

$$i_A(t) = \rho_A(t) \times i_d(t); i_B(t) = \rho_B(t) \times i_d(t); i_C(t) = \rho_C(t) \times i_d(t); \quad (2.3)$$

де $\rho_A(t)$, $\rho_B(t)$, $\rho_C(t)$ - комутаційні функції трифазного випрямляча. Графік зміни $\rho_A(t)$ приведений на рисунку 2.2 для випадку миттєвої комутації вентилів і кута управління $\alpha=0$.

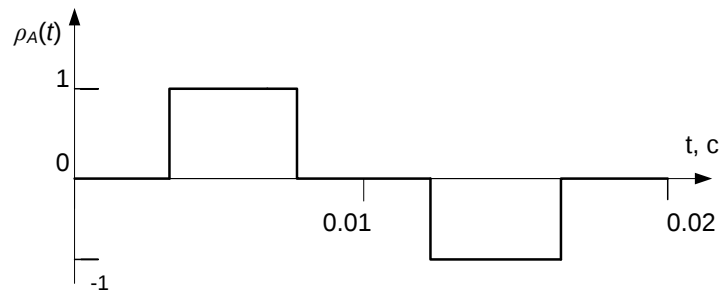
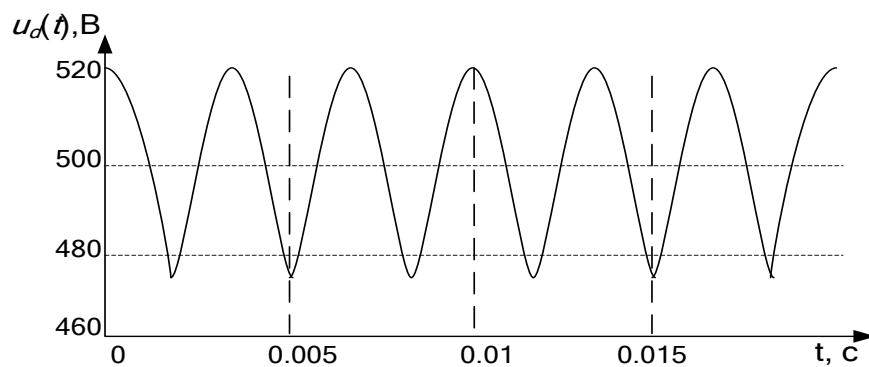


Рисунок – 2.2. Комутаційна функція для фази A трьохфазного випрямляча

Аналітичні функції ρ_A , ρ_B , ρ_C можна апроксимувати таким чином:

$$\begin{aligned}\rho_A(t) &= 0,5 \operatorname{sign}\left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) - 0,5 \operatorname{sign}\left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right); \\ \rho_B(t) &= 0,5 \operatorname{sign}\left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) - 0,5 \operatorname{sign}(\cos(\omega t)); \\ \rho_C(t) &= 0,5 \operatorname{sign}(\cos(\omega t)) - 0,5 \operatorname{sign}\left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right);\end{aligned}\tag{2.4}$$

Згідно виразам (2.1), (2.2) і (2.4) для випрямленої напруги $u_d(t)$ маємо графік, представлений на рисунку 2.3.



Рисунку – 2.3. Випрямлена напруга на виході трифазного випрямляча

Дана функція апроксимується виразом:

$$u_d(t) = 220\sqrt{2}(1,625 + 0,125 \times \cos 6\omega t).$$

Запишемо диференціальне рівняння для R C – ланцюга випрямляча:

$$i_d(t) = i_{\delta}(t) + i_i(t) = C_{\delta} \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_i}.$$

Тоді з урахуванням виразу (2.5) миттєве значення випрямленого струму

$$i_d(t) = -\tilde{N}_{\delta} \times 220\sqrt{2} \times 0,125 \times 6\omega \times \sin 6\omega t + \frac{220\sqrt{2}(1,625 + 0,125 \cos 6\omega t)}{R_i}. \quad (2.6)$$

Миттєві значення фазних струмів, споживаних схемою з мережі, визначаються з врахуванням формул (2.3) і (2.6):

$$i_A(t) = \rho_A(t) \times i_d(t) = \rho_A(t) \left[C_{\delta} \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_i} \right];$$

$$i_B(t) = \rho_B(t) \times i_d(t) = \rho_B(t) \left[C_{\delta} \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_i} \right];$$

$$i_C(t) = \rho_C(t) \times i_d(t) = \rho_C(t) \left[C_{\delta} \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_i} \right].$$

Графік зміни фазного струму $i_A(t)$ при значеннях ємності $C_{\phi} = 100$ мкФ і опору $R_H = 66$ Ом приведено на рисунку 2.4.

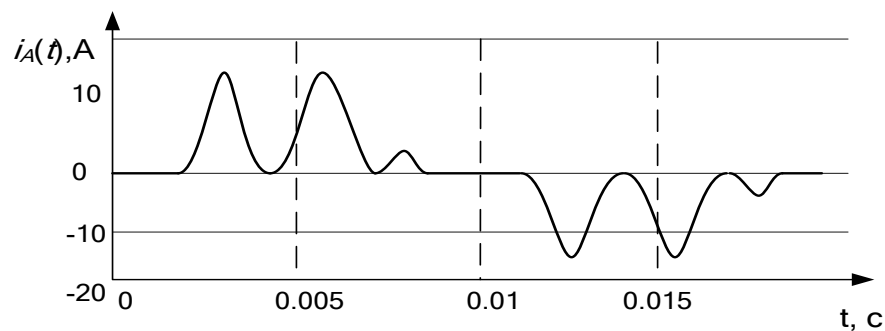


Рисунок – 2.4. Фазний струм на вході трифазного випрямляча

Дана крива може бути апроксимована з певною точністю (з урахуванням погрешності, яка виникає за рахунок наближеного вибору комутаційної функції) тригонометричним поліномом вигляду:

$$i_A(t) = 4,92 \times \cos \omega t + 3,62 \times \sin \omega t - 2,08 \times \cos 5\omega t + 5,08 \times \sin 5\omega t - 1,61 \times \cos 7\omega t - 5,01 \times \sin 7\omega t.$$

З виразу (2.7) видно, що спектр гармонік споживаного струму містить 5-у – 90% і 7-у – 85% від основної, що відповідає результатам гармонійного аналізу фазних

струмів трифазних мостових випрямлячів з фільтром ємності, який було отримано в роботі. Таким чином, коректність проведеного аналітичного моделювання підтверджується результатами, отриманими за допомогою цифрової моделі [8].

У мережах НН широко поширені однофазні випрямні навантаження невеликої потужності, зокрема, комп'ютери, телекомунікаційна апаратура, аудіо-відеотехніка, побутові електроприлади, а також джерела живлення різних електротехнічних установок. Очевидно, що для вказаних однофазних навантажень можна побудувати моделі (аналогічні розглянутим трифазним), що дозволяють проводити гармонійний аналіз їх вхідних струмів. Наприклад, в роботі пропонується аналітичний спосіб визначення вхідних і вихідних струмів однофазних мостових перетворювачів, який ґрунтується на використуванні параметрів холостого ходу T -образної схеми заміщення перетворювача. У роботі представлені результати чисельного моделювання засобами пакету програм PSpice ORCAD 9.2 Trial різних однофазних схем живлення частотнорегульованих приводів.

На рисунку 2.5 показаний однофазний випрямляч з фільтром ємності, включений паралельно активно-індуктивному навантаженню і що харчується від мережі нескінченної потужності напругою $U_{ном} = 220$ В. Нехай параметри цього сумарного навантаження (відповідно до аналізованого варіанту) мають наступні значення: $R = 3,6$ Ом; $L = 21,5$ мГн; $R_{випр} = 29,31$ Ом; $C = 2,56 \times 10^{-3}$ Ф. При цьому потужність випрямляча $P_{випр} = 3,035$ кВт, а частка випрямного навантаження $\alpha = P_{випр}/P_n = 0,5$ (P_n – сумарна активна потужність навантаження).

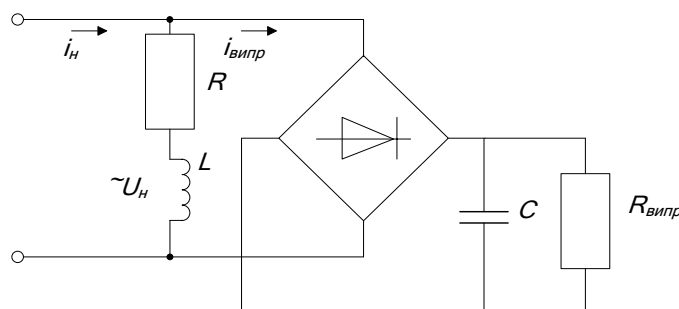


Рисунок – 2.5. Однофазний випрямляч, включений паралельно активно-індуктивному навантаженню

Проведені розрахунки показують, що струм випрямляча з фільтром ємності має яскраво виражений імпульсний характер з великим вмістом вищих гармонік. В результаті коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму випрямляча $K_{I_{випр}}=168,53\%$. Сумарний струм навантаження містить всі гармоніки вхідного струму випрямляча, але $K_{I_H}=70,47\%$, оскільки його перша гармоніка більше. Струм активно-індуктивного навантаження має синусоїдальну форму, оскільки при живленні від мережі нескінченної потужності на нього не впливає випрямне навантаження [9].

Таким чином, розглянуті моделі дозволяють проводити розрахунок вищих гармонік струму з урахуванням характерних параметрів нелінійних електроприймачів. Проте, головним з погляду проведення досліджень ЕМС недоліком розглянутих моделей є те, що спотворення синусоїдальності кривої вхідного струму ПП визначається за умови живлення його від мережі нескінченної потужності. При цьому одержують спектр гармонік струму без урахування зворотної дії на їх величину параметрів мережі, а спотворення синусоїдальності кривій живлячої напруги не розглядають.

2.2. Моделювання і розрахунок струмів і напруг мереж НН з нелінійними навантаженнями

Традиційно для визначення спотворення синусоїдальності кривих напруги в трьохдротяних мережах використовуються моделі, в яких нелінійні навантаження задаються джерелами струмів вищих гармонік. У схемах заміщення мережі для частот вищих гармонік елементи мережі задаються повними опорами, розрахованими для даної частоти. Падіння напруги на еквівалентному повному опорі мережі від струму певної гармоніки, величина якого відома наперед, дає значення напруги даної гармоніки. Розрахувавши необхідну кількість схем заміщення (по числу гармонік, що враховуються), визначають величину коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривих напруги мережі.

Очевидно, що подібні моделі мають ряд недоліків. По-перше, вони не дозволяють досліджувати електромагнітні процеси в мережі з нелінійним навантаженням внаслідок формального характеру побудови схем заміщення. По-друге, величина струмів вищих гармонік визначена, очевидно, за умови живлення нелінійного навантаження від мережі нескінченної потужності і не враховує вплив параметрів конкретної мережі. По-третє, параметри схем заміщення елементів мережі для частот вищих гармонік в даний час визначаються по-різному з істотними розбіжностями в результатах у різних авторів [11].

Всі ці недоліки особливо гостро виявляються при моделюванні мереж НН з нелінійними навантаженнями. Характерні особливості мереж НН, а саме, наявність нульового дроту і відносно низькі значення потужностей короткого замикання, роблять істотний вплив на протікання електромагнітних процесів. Це, у свою чергу, призводить до істотної зміни значень вищих гармонік струму в конкретній мережі НН в порівнянні з порахованими за умови живлення нелінійного навантаження від мережі нескінченної потужності. Тому моделі, в яких нелінійні навантаження задаються джерелами струмів вищих гармонік, безпосередньо, якщо їх не адаптувати, не можна використовувати в мережах НН. Тому в даний час існує потреба в створенні математичних моделей для дослідження електромагнітних процесів в мережах НН з нелінійними навантаженнями з метою визначення їх впливу на мережу з урахуванням конкретних параметрів мережі і навантаження.

Слід зазначити, що в даний час відомі роботи, присвячені аналізу процесів на вході нелінійних електроприймачів, зокрема, випрямлячів з урахуванням параметрів їх вхідного ланцюга. Наприклад, розглянуті спотворення синусоїдальності кривих напруг В СЕ ЕОМ з трифазними ДВЕЖ з безтрансформаторним входом. При цьому одержані аналітичні залежності коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривих напруги від кута комутації, який, у свою чергу, міняється при зміні навантаження, параметрів генераторів і потужності короткого замикання. У роботі виконано моделювання системи «живлячий кабель – некерований однофазний випрямляч, навантажений на RC-ланцюг» за допомогою програмного пакету OrCAD 9.2 і одержані залежності інтегральних характеристик цієї системи, зокрема, спотворень

синусоїдальності кривих вхідних струму і напруги від параметрів системи. У роботі приведені результати аналізу процесів в локальній розподільній мережі, до якої підключене випрямне навантаження. При цьому розглядається спрощена однофазна схема заміщення мережі, яка формується на виході агрегату безперебійного живлення. Таким чином, в згаданих роботах при моделюванні розглядаються лише окремі елементи мережі НН, які не відображають особливостей її побудови, що, в результаті, не дозволяє адекватно оцінити вплив нелінійних електроприймачів на мережу. При розробці математичної моделі мережі НН з нелінійним навантаженням необхідно враховувати наступні обставини. З одного боку, вона повинна забезпечувати моделювання електромагнітних процесів з необхідною точністю і не бути при цьому надмірно складною. З другого боку, при відносній простоті моделі в схемах заміщення повинна бути представлена достатня кількість елементів мережі і навантаження з метою визначення їх впливу на величину вищих гармонік [13].

Як відомо, в мережах НН набули широке поширення імпульсні джерела електроживлення електронної техніки. Як вхідна ланка таких джерел живлення використовується мережевий випрямляч, звичайно некерований, параметри якого разом з параметрами низькочастотного фільтру ємності найбільшою мірою визначають характер і форму споживаного струму. Мережевий випрямляч може бути однофазним або трифазним, причому однофазні випрямлячі більш характерні для мереж НН. Результати аналізу режимів роботи однофазних мережевих випрямлячів з фільтром ємності показують, що споживаний з мережі струм має імпульсний характер, форма якого залежить не тільки від параметрів фільтру ємності, але і від параметрів живлячої мережі, тобто однофазний випрямляч з фільтром ємності є характерним нелінійним навантаженням низьковольтних мереж. При цьому його макромодель при відносній простоті дозволяє проводити аналіз електромагнітних процесів з урахуванням параметрів випрямляча і живлячої мережі. У зв'язку з цим представляється можливим в моделі мережі НН розглянути як нелінійний елемент навантаження однофазний випрямляч, навантажений на RC -ланцюг (рисунок 2.5).

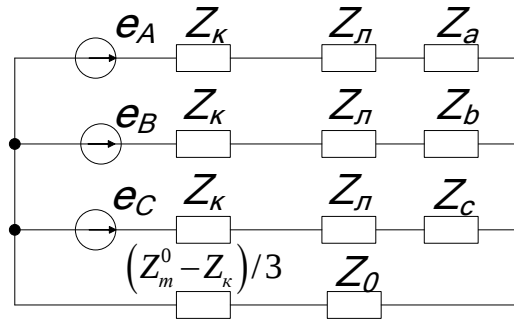
У реальних умовах експлуатації засобу електронної техніки підключаються до конкретної мережі НН. Як було відмічено вище, параметри мережі роблять вплив на

величину струмів і напруг навантаження. Тому для визначення істинного впливу нелінійного навантаження на мережу живлення необхідно моделювати не тільки навантаження, але і мережу, до якої вона буде підключена. З урахуванням відмічених вище вимог можна побудувати математичну модель мережі НН з нелінійним навантаженням на основі двох відомих: моделі трифазної чотирьохдротяної мережі з лінійним навантаженням і моделі нелінійного навантаження. При цьому основними допущеннями будуть наступні: підведені напруги утворюють симетричну і незмінну систему прямої послідовності, всі елементи мережі за винятком навантаження лінійні і симетричні, діоди випрямлячів ідеальні [14].

З урахуванням особливостей побудови мережі НН (мережа виконується трифазною з нульовим проводом, а більшість споживачів – однофазні), її схема заміщення має вигляд, показаний на рисунку 2.6.

Тут e_A, e_B, e_C – трифазна симетрична система ЕДС; Z_K, Z_0^0 – опорів короткого замикання і нульової послідовності трансформатора; Z_0, Z_L – опори нульового і фазного дротів лінії; Z_a, Z_b, Z_c – три опори довільних навантажень, паралельно яким підключаються згадані нелінійні елементи навантаження.

Розроблена модель трифазної чотирьох дротяної мережі з випрямним навантаженням дозволяє провести розрахунок всіх струмів і напруг конкретної мережі НН. Дана модель враховує параметри мереж НН, а саме потужність і схему з'єднання обмоток трансформатора, виконання, довжину і перетин лінії, коефіцієнт потужності, а також параметри випрямного навантаження. В результаті в схемі заміщення елементи мережі і навантаження представляються відповідними опорами, причому розрахунок проводиться на основній частоті. Значення струмів і напруг даної мережі визначаються одночасно рішенням диференціальних рівнянь, що описують лінійні схеми, формовані по етапах провідності ключових елементів (діодів) однофазних випрямлячів [12].



Рисунок– 2.6. Схема заміщення мережі НН

Набуті значення струмів і напруг використовуються для визначення відповідних коефіцієнтів рідів Фур'є, за допомогою яких розраховуються коефіцієнти n -х гармонійних складових струму (напруги) $K_{I(n)} = I_{(n)}/I_{(l)}$ ($K_{U(n)} = U_{(n)}/U_{(l)}$), коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих струму $K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_{(n)}^2}{I_{(l)}^2}}$ і коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги $K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_{(n)}^2}{U_{(l)}^2}}$, (де $I_{(l)}$, $I_{(n)}$, $U_{(l)}$, $U_{(n)}$ – діючі значення складових основної частоти і n -х гармонійних складових струмів і напруг відповідно).

Результати проведених розрахунків для конкретних варіантів виконання мережі НН дозволяють аналізувати вплив випрямної навантаження на форму кривих струмів і напруг. Нехай потужність трансформатора 10/0,4 кВ $S_{Tr} = 25$ кВА; схема з'єднання обмоток зірка – зірка з нулем; $\cos\varphi = 0,8$; лінія виконана кабелем 3х25+1х10 мм; на фазні напруги мережі НН підключені три однакові навантаження, одна з яких показана на рисунку 2.5. При цьому параметри однофазного навантаження залишилися такими, як в попередньому підрозділі. В результаті розрахунку одержуємо змінені в порівнянні з варіантом живлення від мережі нескінченної потужності значення коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривих струму. Величина гармонік струму випрямляча сильно зменшилася, при цьому $K_{I_{випр}} = 56,78\%$. Форма струму в лінійній частині навантаження декілька відрізняється від синусоїдальної. У мережі обмеженої потужності позначається вплив випрямного навантаження. В результаті сумарний фазний струм мережі НН істотно

відрізнятиметься від теоретичного, розрахованого для мережі нескінченної потужності. Його коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої $K_{I_n}=13,57\%$. Нарешті, отримана конкретна величина несинусоїдальності фазної напруги. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в даному випадку рівний $18,66\%$ [15].

Очевидно, що при зміні варіанту виконання мережі (інші схеми з'єднання обмоток трансформатора, виконання лінії 0,4 кВ, $\cos\varphi$, α і т. ін.) зміниться і величина несинусоїдальності струмів і напруг. Розглянемо, як впливає величина частки випрямного навантаження α на форму кривої напруги. Проведені розрахунки підтверджують той факт, що величина α значною мірою визначає величину несинусоїдальності фазної напруги мережі. На рисунку – 2.7 дані залежності коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої K_U і n -ої гармонійної складової $K_{U(n)}$ напруги від величини α . Очевидно, що із збільшенням частки випрямного навантаження зростає несинусоїдальність напруги. Причому криві, описують зміни K_U і $K_{U(3)}$, мають характер статичної функції. Інші залежності $K_{U(n)}$ від α носять складний характер при загальній тенденції зростання із зростанням α .

Неважко побачити, що спотворення форми кривої напруги визначається в основному напругою третьої гармоніки. Решта гармонік вносить незначний внесок. Причому напруги гармонік нульової, послідовності (окрім третьої) порівняні по величині з напругами гармонік прямої і зворотної послідовностей, хоча, як показують розрахунки, величина струмів гармонік, кратних трьом (окрім третьої), невелика. Домінуючий вплив напруг гармонік, кратних трьом, можна пояснити великим еквівалентним опором нульової послідовності мереж з нульовим проводом.

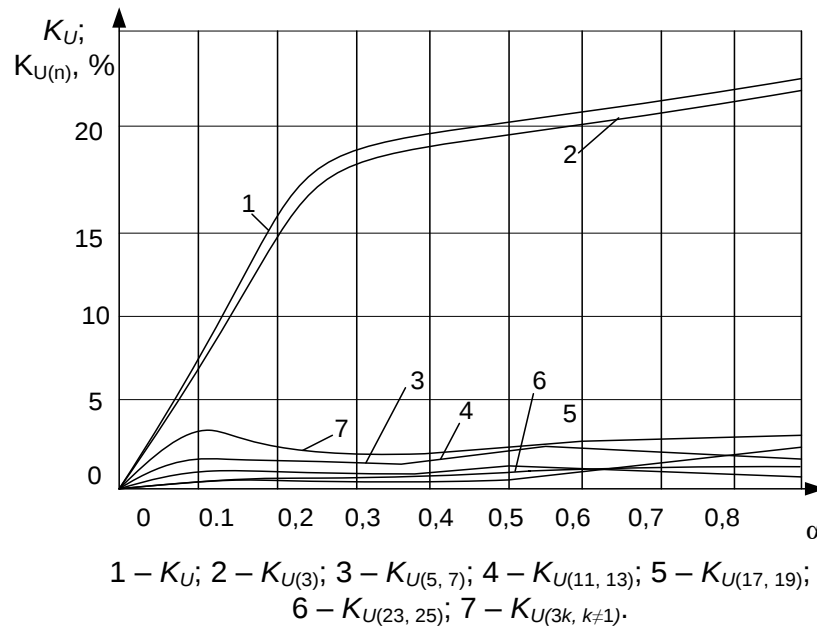


Рисунок – 2.7. Залежності коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої K_U і n -ої гармонійної складової $K_{U(n)}$ напруги від величини частки випрямного навантаження

Протягом аналізу впливу зміни варіанту виконання мережі НН в роботі проведено порівняння результатів розрахунку вищих гармонік мережі при використанні трансформаторів з схемою з'єднання обмоток зірка – зигзаг з нулем і зірка-зірка з нулем. Як відомо, основним недоліком трансформаторів з схемою з'єднання обмоток зірка-зірка з нулем є відносно велике Z_o^0 , яке визначається конструктивними особливостями трансформатора, схемою з'єднання його обмоток, ступенем насичення стрижнів магнітопровода і ін. Така особливість вказаних трансформаторів робить їх чутливими до несинусоїдальності фазних струмів в мережах НН з нелінійними навантаженнями. В результаті було визначено, що в порівнянні з трансформатором, обмотки якого сполучені по схемі зірка – зірка з нулем, використання трансформатора із з'єднанням обмоток по схемі зірка – зигзаг з нулем призводить, зокрема, до зниження K_U на 20÷50% (залежно від величини частки і параметрів випрямного навантаження) при деякому погіршенні гармонійного складу фазного струму [17].

У роботі розглянутий вплив параметрів режимів навантажень трансформатора

на величину несинусоїдальності струмів і напруг в мережі НН. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що відома техніко-економічна вимога про те, що у всіх випадках необхідно прагнути до якнайповнішого використання номінальної потужності трансформатора і навіть доцільно працювати в режимі систематичного перевантаження, у разі нелінійних навантажень одержуємо додаткове аргументування. Зниження коефіцієнта завантаження трансформатора в згаданому випадку, з одного боку, не призводить до істотного зниження рівня вищих гармонік, а з другого – може привести до тимчасових перенапружень в мережах НН.

Очевидно, що розглянута математична модель низьковольтної мережі з випрямним навантаженням дозволяє визначити величину спотворень синусоїдальності кривих струмів напруг мереж НН із зосередженим в одному вузлі навантаженням. Це можуть бути або нерозгалужені автономні мережі з навантаженням, що має в своєму складі радіоелектронну апаратуру з ДВЕЖ з безтрансформаторним входом, або розподільні (міські або сільські) мережі НН, що живлять навантаження крупних об'єктів (будівель, підприємств), яке має в своєму складі нелінійні електроприймачі.

Якщо припустити, що дане навантаження є, наприклад, еквівалентним навантаженням всіх електроприймачів житлової або громадської будівлі, то тоді отримана величина спотворення синусоїдальності кривих напруг на навантаженні відповідатиме несинусоїдальності фазної напруги на введенні в будівлю, а величина спотворення синусоїдальності кривій струму в лінії несинусоїдальності фазного струму зовнішньої живлячої мережі. Насправді кожен електроприймач мережі НН підключається в якійсь конкретній точці до внутрішньої мережі будівлі і має струм і напругу, форма кривих яких відрізняється від форми кривої фазного струму зовнішньої живлячої мережі і напруги на введенні в будівлю відповідно. Очевидно, що розглянута модель не дозволяє визначити величину вищих гармонік струмів напруг внутрішньої мережі електропостачання будівлі і, відповідно, величину спотворень синусоїдальності їх кривих на затисках підключених до неї електроприймачів, а набуті значення несинусоїдальності струмів і напруг через погіршеність еквівалентування всього навантаження мережі в одному вузлі можуть

бути неточними. Окрім цього, при проведенні порівняльного аналізу режимів даної мережі НН в різних варіантах її виконання такі параметри, як частка нелінійного навантаження або коефіцієнт завантаження трансформатора, визначаються формально, без конкретизації складу і графіків навантажень окремих груп електроприймачів. У зв'язку з цим, дану модель слід розглядати як спрощену, а задача її вдосконалення шляхом додаткового обліку конкретних параметрів всіх основних елементів електричної мережі будівлі є актуальною.

2.3. Моделі мереж до 1000 В, в яких нелінійні навантаження задаються джерелами струмів

Не дивлячись на вказані обмеження, що стосуються області застосування розглянутої в попередньому підрозділі математичної моделі, одержані з її допомогою результати достатньо точні, а достовірність їх перевірена на фізичній моделі і не викликає сумніву. Проте в інженерній практиці часто виникає необхідність проведення оцінок, досить наближених, але задовольняючих по точності і невимагаючих залучення комп'ютерної техніки і відповідних тимчасових витрат, розрахунків. У цьому значенні традиційні моделі, в яких нелінійне навантаження задається джерелом струму n -ї гармоніки, представляють безперечний інтерес.

Розглянемо можливість використання подібних моделей для мереж НН. Як було відмічено в підрозділі 2.2, при використанні цих моделей в трьох дротяних мережах величина струму n -ї гармоніки знаходиться за умови підключення даного нелінійного навантаження до мережі нескінченної потужності. Спотворення синусоїдальності кривих напруги при цьому визначається падіннями напруги від відповідних струмів вищих гармонік на опорах подовжніх елементів мережі. У разі трифазної чотирьох дротяної мережі шлях протікання струмів гармонік, кратних трьом відрізняється від шляху протікання струмів решти гармонік. Відповідно до цього за умови симетрії навантажень однолінійні схеми заміщення будуть двох

видів. На рисунку 2.8а показана схема заміщення мережі для гармонік, не кратних трьом ($n \neq 3k, n=1,2,\dots$), а на рисунку 2.8б – для гармонік, кратних трьом ($n=3k, k=1,2,\dots$). У цих схемах нелінійне навантаження представлено джерелом струму n -ї гармоніки. Тут $Z_{K(n)}, Z_{O(n)}^0$ – опори короткого замикання і нульової послідовності трансформатора для n -ї гармоніки; $Z_{Л(n)}, Z_{0(n)}$ – опорів фазного і нульового дротів лінії для n -ї гармоніки; $I_{(n)}, U_{(n)}$ – струм і напруга мережі n -ї гармоніки, причому:

$$U_n = -I_{(n)} \times Z_{(n)},$$

де $Z_{(n)}$ – еквівалентний опір мережі для n -ї гармоніки.

Очевидно, що напруга гармонік, не кратних трьом

$$U_{(n)} = -I_{(n)} \times Z_{(n)} = -I_{(n)} [Z_{k(n)} + Z_{\tilde{e}(n)}] = -I_{(n)} (R_k + R_{\tilde{e}} + jX_k n + jX_{\tilde{e}} n), \quad (2.9)$$

$$Z_{(n \neq 3k)} = R_k + R_{\tilde{e}} + j(X_k + X_{\tilde{e}})n,$$

а напруга гармонік, кратних трьом:

$$U_{(n)} = -I_{(n)} [Z_{O(n)}^0 + Z_{\tilde{e}(n)} + 3Z_{0(n)}], \quad (2.10)$$

$$Z_{(n=3k)} = R_O^0 + R_{\tilde{e}} + 3R_0 + j(X_O^0 + X_{\tilde{e}} + 3X_0)n.$$

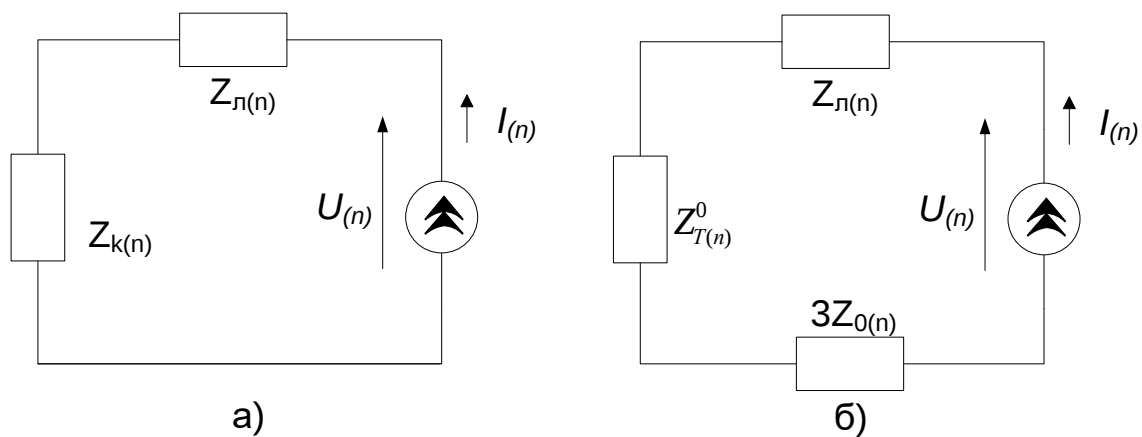


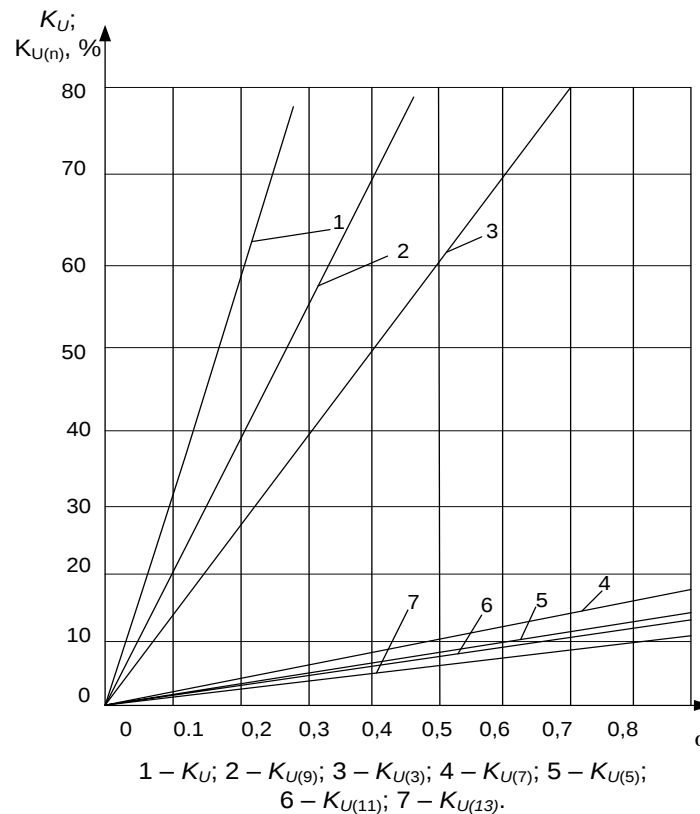
Рисунок – 2.8. Однолінійні схеми заміщення мережі НН з джерелом струму n -ї гармоніки, де а) для $n \neq 3k$, б) $n=3k$

Спочатку переконаємося, що без адаптації традиційних моделей до особливостей мереж НН, їх застосування для аналізу даної низьковольтної мережі неможливе. Знаючи величину струмів вищих гармонік, одержаних за умови живлення випрямляча від мережі нескінченної потужності, і значення відповідних

еквівалентних опорів мережі, за допомогою виразів (2.9) і (2.10) можна визначити значення напруг цих гармонік і K_U . На рисунку 2.9 показані залежності $K_{U(n)}$ і K_U від α для випрямляча з постійного часу RC-ланцюга $\tau=0,075$ с і параметрів розглянутих в підрозділі 2.2 варіанти мережі НН, отримані за допомогою традиційного підходу. З малюнка видно, що напруги даних гармонік вельми значні. В результаті коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривих напруг досягає при $\alpha=0,9$ величини 289,6%. Очевидно, що цей рівень гармонік напруги в реальній мережі неможливий, тобто такий розрахунок гармонік напруги в мережах НН за допомогою традиційних моделей призводить до невірних результатів.

Внесемо певні корективи в розрахунковий механізм, щоб адаптувати дані моделі до особливостей мереж НН і отримати можливість застосування традиційних схем заміщення для інженерних розрахунків. Як вже наголошувалося, при підключенні випрямляча до конкретної мережі НН величина вищих гармонік зменшується в порівнянні з порахованими за умови живлення від мережі нескінченної потужності. Припустимо, що в схемах заміщення (рисунку 2.8) джерело струму n -ї гармоніки генерує струми вищих гармонік, величина яких відповідає порахованим з урахуванням параметрів мережі; при цьому величина еквівалентного опору мережі для n -ї гармоніки залишається колишньою. Визначимо напруги вищих гармонік за допомогою виразів (2.9) і (2.10). Набуті в результаті розрахунку значення напруг вищих гармонік у високій точності співпадають з значеннями відповідних напруг, отриманих за допомогою моделі, що враховує параметри навантаження і мережі.

Слід зазначити, що якнайкращий збіг спостерігається для напруг гармонік з $n < 13$, для яких відносна погрішність складає менше 5%. Таким чином, традиційні однолінійні схеми заміщення, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струму вищих гармонік, можна використовувати для визначення з достатньою для інженерних розрахунків точністю напруг вищих гармонік в мережах НН. Для цього величину струмів вищих гармонік або форму їх кривих (яку, зокрема, можна отримати експериментально) необхідно приводити у відповідність з конкретною мережею НН.



Рисунку – 2.9. Залежності K_U і $K_{U(n)}$ від α у разі використання традиційних моделей без адаптації до особливостей мережі НН

Аналогічним чином можна використовувати і трифазні схеми заміщення мережі НН, які враховують вказані раніше особливості її побудови. У роботі розглянута така схема заміщення мережі НН з нелінійними навантаженнями, представленими джерелами струму довільної форми (рисунок 2.10). При цьому для простоти індуктивні елементи мережі і навантаження не враховуються. На малюнку $e_{A(t)}$, $e_{B(t)}$, $e_{C(t)}$ – трифазна симетрична система ЕДС, $R_{лA}$, $R_{лB}$, $R_{лC}$, R_N – опори фазних і нульового дротів лінії; R_a , R_b , R_c – три довільних опори, паралельно яким підключаються нелінійні навантаження (джерела струму); $i_{A(t)}$, $i_{B(t)}$, $i_{C(t)}$, $i_{N(t)}$ – струми у фазних і нульовому дроті лінії; $I_{a(t)}$, $I_{b(t)}$, $I_{c(t)}$ – фазні струми нелінійних навантажень; $i_{1(t)}$, $i_{2(t)}$, $i_{3(t)}$ – фазні струми в навантажених опорах.

Математична модель, розглянута в попередньому підрозділі, використовувалася для чисельного розрахунку струмів і напруг в мережі НН. У

роботі були отримані аналітичні вирази для режимних параметрів низьковольтної мережі з нелінійними навантаженнями без урахування індуктивності елементів. Для схеми (рисунок 2.10) по методу вузлових напруг (при еквівалентній заміні джерел струму джерелами ЕДС) запишемо рівняння у вигляді:

$$\left(\frac{1}{R_{\bar{e}A} + R_a} + \frac{1}{R_{\bar{e}B} + R_b} + \frac{1}{R_{\bar{e}C} + R_c} + \frac{1}{R_N} \right) \times u_{00^1}(t) = \frac{1}{R_{\bar{e}A} + R_a} [e_A(t) + R_a I_a(t)] + \\ + \frac{1}{R_{\bar{e}B} + R_b} [e_B(t) + R_b I_b(t)] + \frac{1}{R_{\bar{e}C} + R_c} [e_C(t) + R_c I_c(t)].$$

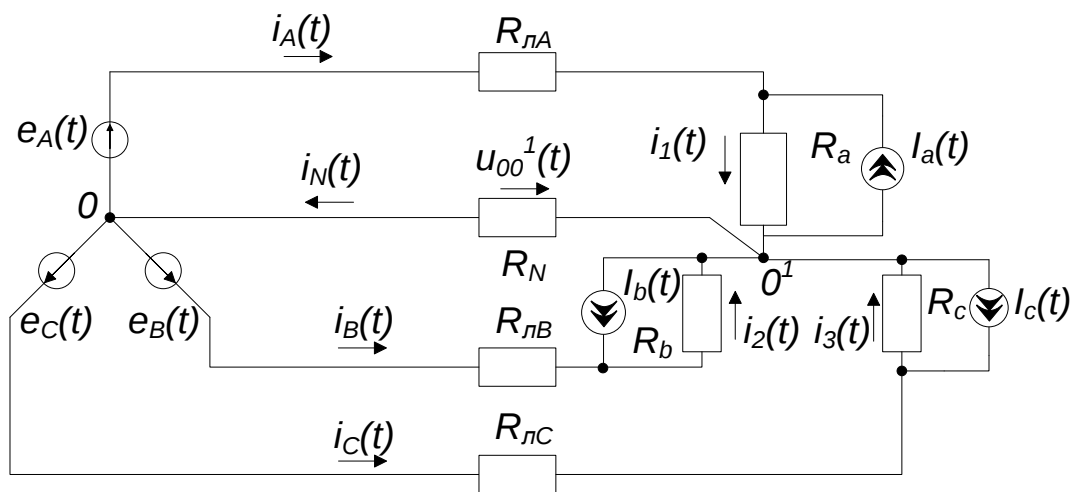


Рисунок – 2.10. Трифазна схема заміщення мережі НН з джерелами струмів нелінійних навантажень

З приведенного рівняння знаходимо падіння напруги в нульовому проводі:

$$u_{00^1}(t) = \frac{\left(\frac{e_A(t) + R_a I_a(t)}{R_{\bar{e}A} + R_a} + \frac{e_B(t) + R_b I_b(t)}{R_{\bar{e}B} + R_b} + \frac{e_C(t) + R_c I_c(t)}{R_{\bar{e}C} + R_c} \right)}{\left(\frac{1}{R_{\bar{e}A} + R_a} + \frac{1}{R_{\bar{e}B} + R_b} + \frac{1}{R_{\bar{e}C} + R_c} + \frac{1}{R_N} \right)}. \quad (2.11)$$

Тоді струми у фазних проводах лінії:

$$i_A(t) = \frac{e_A(t) + R_a I_a(t) - u_{00^1}(t)}{R_{\bar{e}A} + R_a}; \\ i_B(t) = \frac{e_B(t) + R_b I_b(t) - u_{00^1}(t)}{R_{\bar{e}B} + R_b}; \quad (2.12)$$

$$i_C(t) = \frac{e_C(t) + R_C I_C(t) - u_{00^1}(t)}{R_{LC} + R_C};$$

а струм в нульовому проводі:

$$i_N(t) = \frac{u_{00^1}(t)}{R_N}. \quad (2.13)$$

Струми в опорах навантажень будуть наступними:

$$i_1(t) = i_A(t) - I_a(t);$$

$$i_2(t) = i_B(t) - I_b(t);$$

$$i_3(t) = i_C(t) - I_c(t);$$

Як і раніше, як нелінійне навантаження в схемі заміщення мережі НН розглядаємо однофазний випрямляч, схема якого приведена на рисунку 2.5. Відомо, що поведінка цієї схеми, обумовлена процесами заряду і розряду конденсатора фільтру, характеризується імпульсним режимом роботи випрямляча. Це означає, що якщо на вхід, вказаної схеми подається напруга $u(t) = U_m * \sin \omega t$, то вхідний струм $I(t)$ буде мати імпульсний характер з великим вмістом вищих гармонік. У зв'язку з цим, представимо вхідний струм розглядуваного нелінійного електроприймача у вигляді:

$$I(t) = \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[(2n-1) \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.14)$$

або
$$I(t) = \frac{I_m}{\pi} (\sin \omega t - \sin 3\omega t + \sin 5\omega t - \sin 7\omega t + \dots)$$

Слід відмітити, що вираз (2.14) лише відображує імпульсний характер розглядуваного вхідного струму, гармонійний спектр якого, як відомо, містить непарні гармоніки, спів розмірні за величиною з першою. Тому дане представлення його кривої не претендує на високу точність, але з методичної точки зору представляється цілком коректним. Наприклад, таке ж представлення вхідного струму випрямляча з фільтром ємності використовується при моделюванні його вихідної напруги в сталих і перехідних режимах.

Тоді з врахуванням (2.14) для фазних складових джерела струму приймаємо:

$$\begin{aligned}
I_a(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[(2n-1) \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right]; \\
I_b(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[(2n-1) \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \right]; \\
I_c(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[(2n-1) \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right].
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Трифазна система ЕДС задається у вигляді

$$\begin{aligned}
e_a(t) &= 220\sqrt{2} \sin \omega t; \\
e_b(t) &= 220\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\
e_c(t) &= 220\sqrt{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right).
\end{aligned} \tag{2.16}$$

У відповідності до параметрів даного варіанту мережі НН за допомогою формул (2.11) – (2.16) були проведені розрахунки режимних параметрів, графіки яких приведені на рисунку 2.11 (вхідний струм випрямляча), на рисунку 2.12 (струм у фазному дроті лінії), на рисунку 2.13 (струм в нульовому дроті лінії).

Аналіз даних результатів показав певну їх відмінність від результатів, отриманих за допомогою точної моделі. Очевидно, що ця відмінність визначається точністю представлення струму нелінійного навантаження U вигляді певного аналітичного виразу або точністю його приведення у відповідність з конкретною мережею НН. Більш точні результати можна імовірно очікувати при використанні експериментально отриманих осцилограм кривих струмів нелінійних навантажень. Тому отримані аналітичні характеристики можна використовувати в подальших дослідженнях для наближеного аналізу електромагнітних процесів в мережах НН з нелінійними навантаженнями.

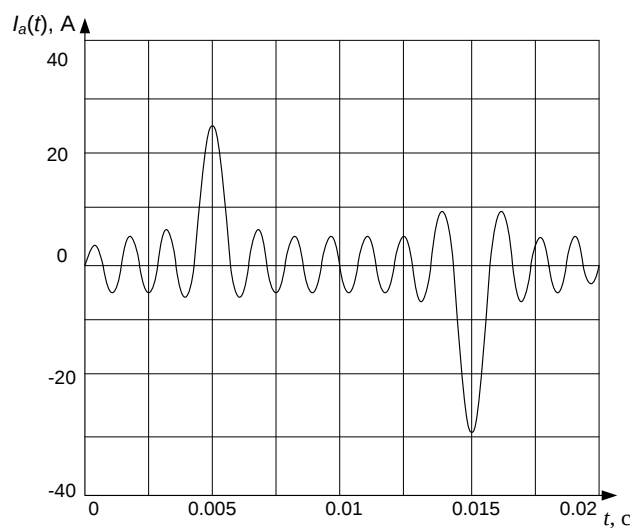


Рисунок – 2.11. Вхідний струм однофазного випрямляча

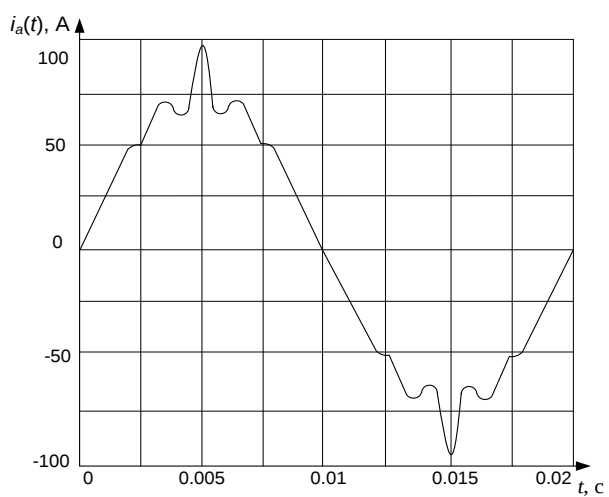


Рисунок – 2.12. Струм у фазному дроті лінії

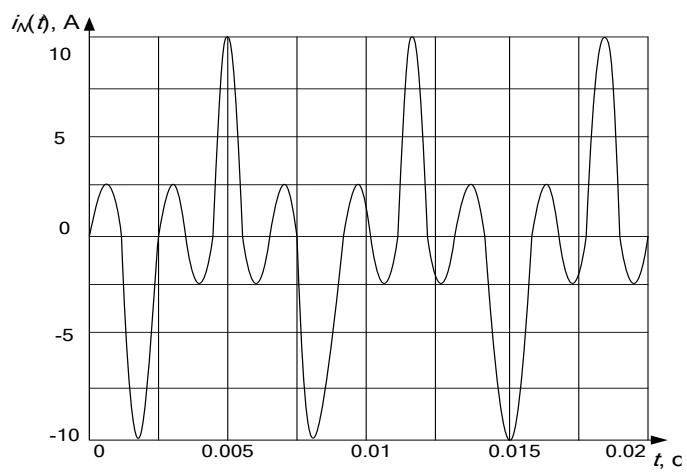


Рисунок – 2.13. Струм в нульовому дроті лінії

2.4. Аналіз залежностей величин вищих гармонік струму і напруги за допомогою традиційних моделей

Розглянемо декілька режимів, кожний з яких визначається конкретною схемою з'єднання обмоток трансформатора, виконанням лінії, завантаженням трансформатора і т. ін. Для кожного з тих режимів, що розглядаються змінюється спектр вищих гармонік струму і відповідний йому спектр вищих гармонік напруги. Окрім цього, змінюється величина еквівалентного опору мережі для n -ї гармоніки $Z_{(n)}$, яка визначається опорами конкретних елементів мережі. Очевидно, що в мережах НН точно визначити значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U , не знаючи величини гармонік струму, що генеруються конкретним нелінійним навантаженням в конкретному режимі, не представляється можливим.

У роботі розглянемо, як змінюється величини вищих гармонік при зміні схеми з'єднання обмоток трансформатора. Якщо ми розрахуємо за допомогою точної моделі значення K_U для мережі НН з трансформатором, обмотки якого сполучені по схемі зірка – зигзаг з нулем, то їх величина відповідатиме верхній кривій (розрахунок), показаної на рисунку 2.14. Відомо, що при з'єднанні обмоток по такій схемі опір нульової послідовності трансформатора Z_0^0 на порядок менше відповідного опору при з'єднанні обмоток по схемі зірка-зірка з нулем. В результаті зменшується величина $Z_{(n=3k)}$ для даного режиму. Якщо ми використовуємо вирази (2.9) і (2.10) для визначення напруг вищих гармонік, підставивши відомі значення $I_{(n)}$, підраховані для мережі НН з трансформатором, обмотки якого сполучені по схемі зірка-зірка з нулем, і знов розраховані значення $Z_{(n)}$ то отримаємо значення K_U , залежність якого від α показана на рисунку 2.14 у вигляді нижньої кривої (припущення).

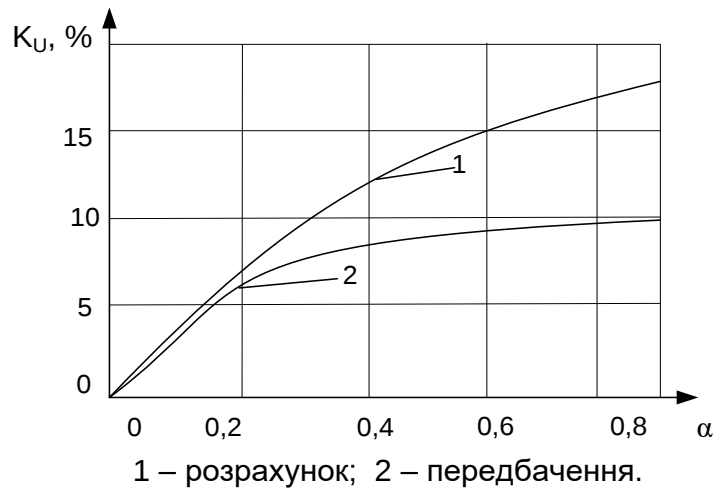


Рисунок – 2.14. Зменшення величини K_U у випадку неправильного врахування зміни схеми з'єднання обмоток трансформатора

З малюнка видно, що розрахункове значення K_U перевищує передбачувані в 1,6÷1,8 рази. Це викликано збільшеною амплітудою струмів вищих гармонік (особливо кратних трьом) при використанні трансформатора з схемою з'єднання обмоток зірка – зигзаг з нулем. Таким чином, використання традиційних моделей для визначення напруг вищих гармонік в мережі НН з трансформатором, обмотки якого сполучені по цій схемі, на підставі наявної інформації про величину вищих гармонік струму, що генеруються даним нелінійним навантаженням уразі використання трансформатора з схемою з'єднання обмоток зірка – зірка з нулем, призводить до невірних результатів. При цьому амплітудні значення і фази напруг окремих гармонік значно відрізняються від розрахованих за допомогою точної моделі.

Проаналізуємо можливість використання виразів (2.9) і (2.10) для визначення напруг вищих гармонік при різних значеннях коефіцієнта завантаження трансформатора β . На рисунку 2.15 показані залежності K_U від α при $\beta=0,8$ і $0,4$, причому дві верхні криві (розрахунок) побудовані з урахуванням результатів, отриманих шляхом точного моделювання даних режимів навантажень. Дві нижні криві (припущення) побудовані з урахуванням величини струмів вищих гармонік, яка скоректована відповідно до величини β . При цьому припущенні нелінійне

навантаження представлялося джерелом струмів вищих гармонік $i_{(n)}^{\beta} = \beta \times i_{(n)}^{100\%}$, де $i_{(n)}^{100\%}$, $i_{(n)}^{\beta}$ – струм n -ї гармоніки для випадків 100% навантаження трансформатора і передбачуваного навантаження трансформатора, що визначається величиною β .

З рисунка 2.15 видно, що при зниженні β росте помилка від розрахунку з урахуванням передбачуваних значень $i_{(n)}^{\beta}$. Якщо при $\beta=0,8$ розрахункові значення K_U перевищують передбачувані в $1,1 \div 1,2$ рази, то при $\beta=0,4$ в $1,8 \div 2,1$ рази. Як і в попередньому випадку амплітудні значення окремих гармонік напруги, розраховані двома методами, відрізняються у декілька разів.

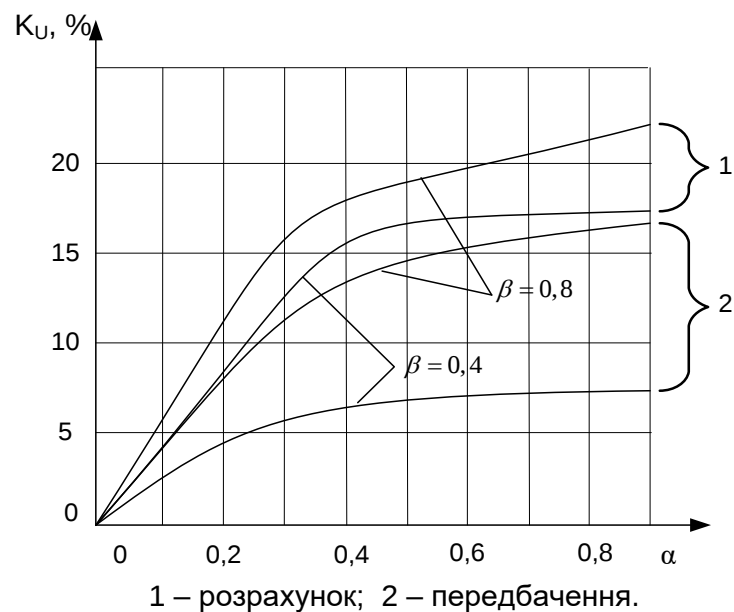


Рисунок – 2.15. Зменшення величини K_U у випадку неправильного обліку зміни коефіцієнта завантаження трансформатора

Отримані результати можна пояснити наступним чином. Кожний конкретний режим визначається конкретним співвідношенням параметрів мережі і навантаження і, як наслідок, характером протікання електромагнітних процесів. В результаті кожного конкретного режиму підключення нелінійного навантаження до низьковольтної мережі характеризується певною величиною спотворення форм кривих як струму. Так і напруги і, відповідно, певною величиною їх вищих гармонік. У зв'язку з цим формально використовувати вирази (2.9) і (2.10) для знаходження значень напруги вищих гармонік одного режиму по значеннях струмів вищих

гармонік інших режимів (навіть дуже близьких) з метою проведення точного аналізу не представляється можливим.

Тому, з врахуванням вищевикладеного, схеми заміщення мережі НН з нелінійним навантаженням, в яких дане навантаження представляється джерелами струмів вищих гармонік можна використовувати для розробки наближених оціночних методик. За допомогою таких методик можна, зокрема, проводити загальний аналіз впливу нелінійних навантажень на форму кривих струмів і напруг в трьохфазних мережах з нульовим проводом. Для проведення даного аналізу необхідно визначити залежність між коефіцієнтом n -ї гармонійної складової напруги у вигляді $K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}}}$ і коефіцієнтом n -ї гармонійної складової струму у

вигляді $K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}}}$ (тут $I_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{(n)}$, $U_{(n)}$ – діючі значення струму і напруги номінальних фазних і n -ї гармоніки відповідно) для конкретної мережі. Спростивши вираз (2.8) переходом до діючих значень струму і напруги і підставивши у нього $I_{(n)}$ і $U_{(n)}$, вираз через $K_{I(n)}$ і $K_{U(n)}$, отримаємо $U_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} K_{U(n)} = I_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} K_{I(n)} z_{(n)}$.

Розділивши ліву і праву частини на $I_{ном}$, знайдемо:

$$K_{U(n)} = \frac{z_{(n)}}{z_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} K_{I(n)}},$$

де $z_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}}$ – повний опір навантаження, $z_{(n)}$ – повний опір мережі для n -ї гармоніки.

Для визначення повного опору навантаження знаходимо:

1). Повний, активний і індуктивний опір фази мережі:

$$z_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} = \frac{3U_{n\max}}{S_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}}}, U_{n\max} = 1,1 \times U_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}},$$

$$R_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} = z_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} \cos \varphi, X_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} = z_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} \sin \varphi.$$

2). Активний і індуктивний опори фазних поздовжніх елементів мережі:

$$R_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} = R_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} + R_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}},$$

$$X_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} = X_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}} + X_{\hat{\hat{\hat{\imath}}}}.$$

3). Активний, індуктивний і повний опір навантаження:

$$R_i = R_{\delta} - R_{\bar{e}\bar{e}}, \quad X_i = X_{\delta} - X_{\bar{e}\bar{e}}, \quad z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}.$$

Позначивши $\frac{z_{(n)}}{z_i} = A_{(n)}$, отримаємо $K_{U(n)} = A_{(n)} K_{I(n)}$.

Таким чином, знаючи величини $z_{(n)}$ і $z_{(n)}$ для конкретної мережі, ми можемо визначати залежність $K_{U(n)}$ від $K_{I(n)}$ в цій мережі, не конкретизуючи нелінійне навантаження.

Як приклад розглянемо мережу НН, яка представлена трансформатором потужністю 25 кВА (схема з'єднання обмоток зірка-зірка з нулем), кабельною лінією перерізом 3х25+1х10 мм² довжиною 0,2 км і навантаженням, яке є джерелом струмів вищих гармонік, причому $\cos\varphi=0,95$. Тоді опори елементів схеми заміщення (Ом):

$$R_{\bar{e}} = 0,1539, \quad R_{\bar{o}}^0 = 1,65, \quad R_{\bar{e}} = 0,2455, \quad R_0 = 0,6138,$$

$$\tilde{O}_{\bar{e}} = 0,2436, \quad \tilde{O}_0^0 = 1,93, \quad R_{\bar{e}} = 0,0131, \quad R_0 = 0,00145.$$

В результаті розрахунку отримуємо $z_n=5,941$ Ом, а значення $z_{(n)}$ можна знайти з виразів (2.9) і (2.10). Тоді для даного варіанту мережі НН отримуємо значення $A_{(n)}$, які представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів $A_{(n)}$ для одного з варіантів мережі НН

n	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$A_{(n)}$	1,184	0,226	0,309	3,074	0,48	0,566	5,055	0,738	0,824

Очевидно, що значення $A_{(n=3k)}$ в загальному випадку суттєво перевищує значення $A_{(n \neq 3k)}$. Відповідно до цього, напруги гармонік, кратних трьом, мають визначальне значення для сумарної напруги вищих гармонік навіть при невеликих значеннях відповідних складових струмів. При однаковому відносному рості струмів всіх гармонік напруги $U_{(n=3k)}$ зростають значно швидше напруг $U_{(n \neq 3k)}$. На рисунку 2.16 показані залежності $K_{U(n)} = f[K_{I(n)}]$ для розглядуваних гармонік. З представлених графіків видно, що при $K_{I(3)}=10\%$ $K_{U(3)}=11,84\%$, а при $K_{I(5)}=10\%$ $K_{U(5)}=2,26\%$. Якщо відповідний $K_{I(n)}$ зростає до 20%, то $K_{U(3)}$ збільшується до 23,68%, а $K_{U(5)}$ – лише до 4,52%. Відповідно до ГОСТ 13109-97 нормально допустиме значення $K_{U(n)}$ при $n=3$ рівне 5%, а при $n=5$ - 6%. З графіків (Рис. 2.16) видно, що для

виконання цієї умови в розглядуваній мережі $K_{I(3)}$ не повинен перевищувати 4,22%. Для порівняння: вимоги ГОСТ 13109-97 для вищих гармонік з $n=5$ в цьому випадку виконується при $K_{I(5)} \leq 26,51\%$.

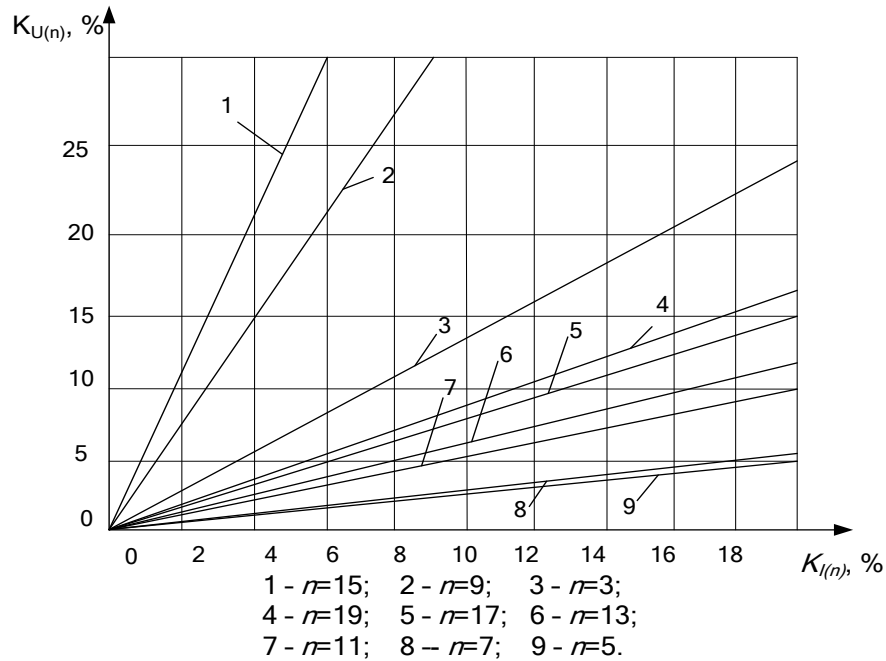
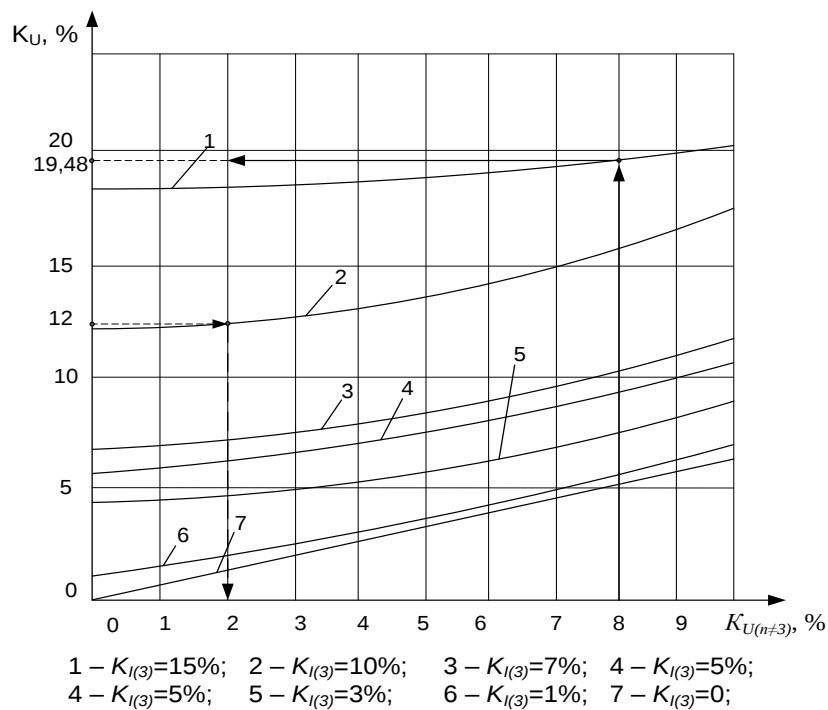
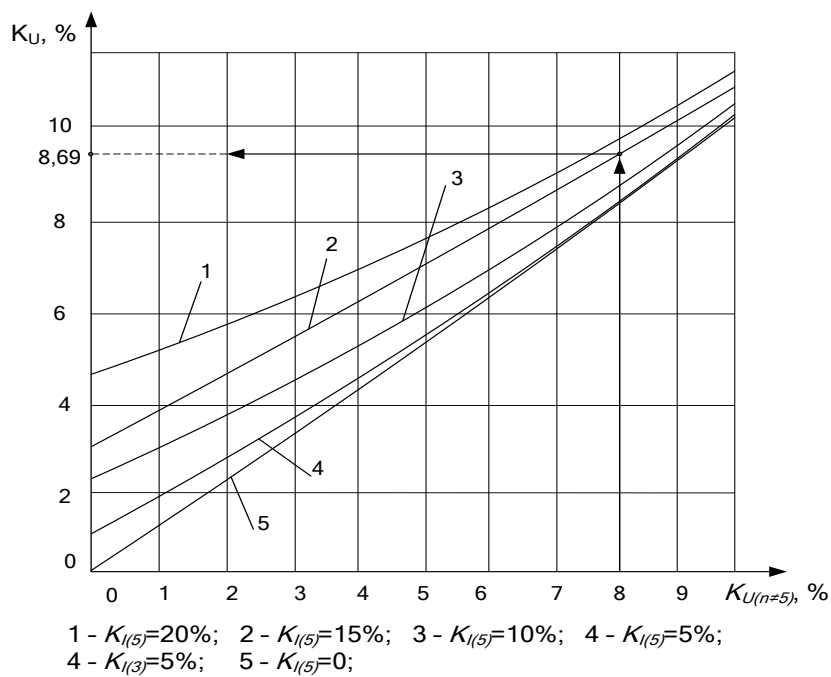


Рисунок – 2.16. Залежності $K_{U(n)}$ від $K_{I(n)}$ для одного з конкретних варіантів виконання мережі НН

Таким чином, одержані криві наочно показують, що навіть низький рівень струмів гармонік, кратних трьом (одиниці відсотків), може привести до значних спотворень напруг. Разом з тим навіть великі значення струмів гармонік з $n \neq 3k$ (десятки відсотків) часто не приводять до порушення вимог ГОСТ 13109-97 до величини $K_{U(n)}$.



а)



б)

Рисунок – 2.17 Залежності K_U від $K_{I(n=m)}$, $K_{U(n \neq m)}$ для одного з варіантів виконання мерері НН: а) при $t=3$, б) при $t=5$

Наявність гармонік з $n=3k$ в спектрі вищих гармонік струму є визначальним чинником для величини коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривих напруг K_U . На рисунку 2.17 а, б показані залежності $K_U=f[K_{I(n=m)}, K_{U(n\neq m)}]$ відповідно для випадків $m=3$ і $m=5$, де $K_{U(n\neq m)}$ – коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги з врахуванням всіх гармонік, крім $n=m$. Сімейство кривих для заданих гармонік описується виразом:

$$K_U = [K_{U(n\neq m)}]^2 + A_{(m)}^2 K_{I(m)}^2.$$

За допомогою вказаних графіків легко визначити, як струми різних гармонік впливають на величину K_U . Аналіз графіків показує, що, наприклад, збільшення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги за рахунок третьої гармоніки струму при $K_{I(3)}=3\%$ (рисунку 2.17 а) можна порівняти з збільшенням K_U за рахунок п'ятої гармоніки струму при $K_{I(5)}=15\%$ (рисунок 2.17 б). Продовжуючи аналіз, можна легко показати на графіках, що за рахунок третьої гармоніки струму ($K_{I(3)}=15\%$) K_U збільшується на з 8 до 19,48% (рисунок 2.17 а), а за рахунок п'ятої гармоніки струму ($K_{I(5)}=15\%$) K_U змінюється з 8 до 8,69%, тобто збільшення складає лише 0,69% (рисунок 2.17 б). Розглянемо випадок (рисунок 2.13 а), коли $K_U=12\%$, при чому відомо, що $K_{I(3)}=10\%$. З малюнка видно, що несинусоїдальність напруги, викликана іншими гармоніками, буде визначатися величиною $K_{U(n\neq 3)}=2\%$.

З рисунку 2.17 б випливає, що при $K_U>8\%$ п'ята гармоніка струму ($K_{I(5)}=10\%$) майже не впливає на величину коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги.

Покажемо за допомогою розглядуваних графіків, як ця властивість трифазних чотирипровідних мереж, які полягають в переважаючому впливові гармонік, кратних трьом, можна використовувати на практиці. Очевидно, що, фільтруючи струми вказаних гармонік, можна значно знизити несинусоїдальність напруги. Це передбачає застосування фільтрів струмів гармонік, кратних трьом, як ефективний засіб зниження спотворень форми кривих напруг в трифазних мережах з нульовим проводом. Слід зазначити, що для конкретної мережі завжди можна побудувати графіки, аналогічні показаним на рисунку 2.17, і з їх допомогою, знаючи величини

K_U і $K_{I(n=3k)}$, визначити величину $K_{U(n \neq 3k)}$. В результаті можна наперед зробити висновки про ефективність фільтрації вищих гармонік за допомогою згаданих фільтрів в даній мережі. Наприклад, для даного варіанту мережі (див. рисунок 2.17а) при $K_{I(3)}=15\%$ повна фільтрація струму третьої гармоніки може привести до величини $K_{U(n \neq 3)} \leq 8\%$ (по ГОСТ 13109-97) у випадку, якщо до фільтрації коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги був не більше 19,5%.

Очевидно, що спотворення форми кривої струму, що викликане нелінійним навантаженням, можна визначити коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої струму K_I , виражаючи його через коефіцієнти n -ї гармонійної складової струму:

$$\hat{E}_2 = \sqrt{\sum_{n=2}^N \hat{E}_{2(n)}^2},$$

де N – порядок останньої з врахованих гармонік струму.

Виходячи з попередніх висновків, можна припустити, що K_I не є показником, який однозначно характеризує вплив нелінійного навантаження на форму кривої напруги мережі. Очевидно, що при постійному K_I , величина $K_{I(n)}$ у кожному конкретному випадку для різних гармонік може суттєво відрізнятися, що в свою чергу приведе до різних значень K_U .

Покажемо це на прикладі даного варіанту мережі НН. Для простоти вважатимемо, що нелінійне навантаження викликає появу тільки третьої, п'ятої і сьомої гармонік струму. Нехай $K_I = \text{const} = 14,14\%$, а величина $K_{I(n)}$ для цих трьох гармонік змінюється і може приймати одне із значень: 6, 8 або 10%. В результаті K_U при різних значеннях $K_{I(n)}$ змінює свою величину від 7,86 до 12,17%.

Залежності K_U від величини $K_{I(n)}$ для гармонік з $n=3, 5, 7$ описуються виразом:

$$K_U = \sqrt{A_{(3)}^2 K_{I(3)}^2 + A_{(5)}^2 K_{I(5)}^2 + A_{(7)}^2 K_{I(7)}^2}.$$

Так як $K_I = \text{const}$, то, наприклад, для кожної пари значень $K_{I(5)}$ і $K_{I(7)}$ однозначно знаходимо $K_{I(3)}$ з виразу:

$$K_I = \sqrt{K_{I(3)}^2 + K_{I(5)}^2 + K_{I(7)}^2}.$$

Аналогічно по наявних значеннях $K_{I(3)}$ і $K_{I(7)}$ можна знаходити $K_{I(5)}$. Очевидно,

що при постійному $K_I=14,14\%$ і змінних в широких межах $K_{I(n)}$ (від 0 до $14,14\%$) діапазон зміни K_U дуже великий – від 3,2 до $16,8\%$. Меншому значенню K_U відповідає варіант, коли все спотворення форми кривої напруги викликане струмом п'ятої гармоніки при $K_{I(5)}=14,14\%$. Більше значення $K_U = 16,8\%$ виходить при $K_{I(3)}=14,14\%$; $K_{I(5)}=0$ і $K_{I(7)}=0$.

Таким чином, показано, що при одному і тому ж значенні K_I , величина K_U визначається кількісним і якісним складом спектру вищих гармонік струму нелінійного навантаження і може приймати самі різні значення. При цьому, як наголошувалося і раніше, визначальним чинником є величина струмів гармонік, кратних трьом. Цю обставину слід враховувати як при розробці фільтруючих пристроїв, так і при проектуванні обладнання, яке є джерелом вищих гармонік струму. Тому при мінімізації K_I , вхідного струму даного нелінійного навантаження необхідно в першу чергу (якщо є така можливість) знижувати рівень гармонік, кратних трьом, причому в цьому випадку можна допустити збільшення рівня інших гармонік і навіть K_I .

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що з допомогою моделей мереж НН, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струмів вищих гармонік, зручно проводити аналіз залежностей величин вищих гармонік струму і напруги. При цьому, не конкретизуючи нелінійне навантаження, можна розглядати конкретну низьковольтну мережу з певними параметрами. Запропонований метод дає можливість готувати демонстраційні або учбові матеріали, а також розробляти відповідні методики, що дозволяють оцінити рівень вищих гармонік і визначити деякі закономірності для трифазних мереж з нульовим проводом, наприклад, наочно показати домінуючий вплив гармонік, кратних трьом. При цьому можна зокрема запропонувати напрям оптимізації і рекомендувати засоби зниження рівня вищих гармонік [18].

Висновки по розділу 2

Проведено аналіз існуючих математичних моделей, які дозволяють проводити дослідження електромагнітних процесів в мережах НН з нелінійними навантаженнями з метою визначення їх впливу на мережу з урахуванням конкретних параметрів мережі і навантаження. Відомі моделі трифазних чотири дротяних мереж з випрямним навантаженням дозволяють проводити розрахунок всіх їх струмів і напруг з урахуванням параметрів зовнішньої живлячої мережі. Визначено, що результати проведених розрахунків для конкретних варіантів виконання мережі НН можна використовувати для аналізу впливу одного трифазного блоку нелінійних навантажень з конкретними параметрами на форму кривих струмів і напруг. В результаті цього аналізу, зокрема, встановлено, що спотворення форми кривої напруги визначається в основному напругою гармонік, кратних трьом.

Встановлено, що традиційні схеми заміщення, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струму вищих гармонік, можна використовувати для визначення з достатньою для інженерних розрахунків точністю напруг вищих гармонік в мережах НН. Для цього величину струмів вищих гармонік або форму їх кривих (яку, зокрема, можна одержати експериментально) необхідно приводити у відповідність з конкретною мережею НН. Вказані схеми заміщення мережі НН з нелінійним навантаженням представляється можливим використовувати для розробки наближених оцінних методик, за допомогою яких можна проводити аналіз впливу конкретного нелінійного навантаження на форму кривих струмів і напруг в трифазних мережах з нульовим проводом.

Визначено, що за допомогою моделей мереж НН, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струмів вищих гармонік, зручно проводити загальний аналіз залежностей величин вищих гармонік струму і напруги. Запропонований метод аналізу, який дозволяє, не конкретизуючи нелінійне навантаження, розглядати конкретну низьковольтну мережу з певними параметрами. Показано, що за допомогою вказаного підходу можна готувати

демонстраційні або учбові матеріали, а також розробляти відповідні методики, що дозволяють оцінити рівень вищих гармонік і визначити деякі закономірності для трифазних мереж з нульовим проводом, потім пояснити вибір напрямку оптимізації і рекомендувати засоби зниження рівня вищих гармонік.

Показано, що розглянуті математичні моделі низьковольтних мереж з нелінійним навантаженням дозволяють визначити величину спотворень синусоїдальності кривих струмів і напруг мереж НН із зосередженим в одному вузлі навантаженням. Це можуть бути або нерозгалужені автономні мережі з навантаженням, що має в своєму складі радіоелектронну апаратуру з ДВЕЖ з безтрансформаторним входом, або розподільні (міські або сільські) мережі НН, що живлять навантаження крупних об'єктів (будівель, підприємств), яке має в своєму складі нелінійні електроприймачі. Визначено, що, якщо рахувати дане навантаження, наприклад, еквівалентним навантаженням всіх електроприймачів житлової або громадської будівлі, то тоді одержана величина спотворення синусоїдальності кривих струму і напруги на навантаженні відповідатиме несинусоїдальності фазних струмів і напруг зовнішньої живлячої мережі.

Встановлено, що розглянуті моделі не дозволяють визначити величину вищих гармонік струмів і напруг внутрішньої мережі електропостачання будівлі і відповідно, величину спотворень синусоїдальності їх кривих на затисках підключених до неї електроприймачів. Окрім цього, набуті значення несинусоїдальності струмів і напруг зовнішньої живлячої мережі визначаються формально, без конкретизації складу і графіків навантажень окремих груп електроприймачів. Тому для визначення кількісних характеристик несинусоїдальності струмів і напруг в характерних вузлах навантажень внутрішньої мережі будівлі дані моделі необхідно удосконалити шляхом додаткового обліку конкретних параметрів всіх основних елементів його електричної мережі.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці, що стосуються експлуатації мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням. На електротехнічний оперативний персонал, що здійснює роботи в розподільчих мережах, впливають такі шкідливі виробничі фактори:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі переважно фіброгенної дії (нетоксичний пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

3.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

3.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Під час експлуатації обладнання для діагностування ізоляції розподільчих мереж для забезпечення працівників всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги потрібно постійно заземлювати. За необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо замикається на спеціально призначених для цього затискачах. Розривати кола, підключені до вторинної обмотки

трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: затискачі вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗА і Т) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗА і Т слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками. Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (зокрема, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі РЗА і Т за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої

комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗА і Т, провадять тільки оперативні працівники. Записувати покази вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється: одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III – без місцевих оперативних працівників; працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника [19].

В електроустановках до 1000 В споживачів, які не мають електротехнічних працівників, оформлення робіт нарядом (розпорядженням), підготовку робочих місць і допуск до робіт з електролічильниками, за показами яких здійснюються розрахунки за спожиту електроенергію, можуть виконувати працівники електропостачальної організації. Встановлення та зняття вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий – групу III. Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III. Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця; розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям. В разі виявленні

порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту, користування ними забороняється.

В процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих засобів. Без застосування електрозахисних засобів забороняється торкатися ізоляторів електроустановки, що перебуває під напругою. В електроустановках забороняється працювати у зігнутому стані, якщо в разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде меншою від допустимих. В процесі виконання робіт біля необгороджених струмопровідних частин забороняється розташовуватися таким чином, щоб ці частини знаходилися позаду чи з двох боків.

3.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ ПБЕ умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях, що будуються, є струмопровідною.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення. Електропривід насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

Обов'язкова установка захисного заземлення та захисного відключення. При роботі з електроустаткуванням використовуються основні і додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі та

струм вимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

3.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

3.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [20]. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень наведені в таблиці 6.1. Робота з експлуатації системи діагностики стану ізоляції відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Таблиця 3.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холодний	Пб	13-23	75	не більше 0,4
Теплий		15-29	70 при 25 °С	0,2-0,5

3.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

Під час експлуатації виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до наведено в таблиці 3.2.

Для забезпечення допустимих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до ДБН проектом передбачені наступні рішення: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановлені

безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

Таблиця 3.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні монтажника

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

3.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечері постає проблема в штучному освітленні. Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 3. 3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 3.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	г	середній	світлий	-	200	4	2,4

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

3.2.4 Виробничий шум

Під час монтажу системи опалення на будівництві джерелом шуму є будівельне обладнання, машини, механізми та переносний електроінструмент – механічний шум. При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи: нормування за гранично допустимим спектром шуму; нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра. За характером спектру шум – широкопasmовий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою – постійний; за походженням – гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 і наведені в таблиці 3.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 3.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц
--------------	--

	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На постійних Робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

3.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019, за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою.

Приміщення п/ст, задіяні для виконання робіт, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д –речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

П/ст, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з

деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колони	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекрыття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 3.7 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого

призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 3.7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 3.7 (знаменник).

Таблиця 3.7 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території п/ст встановлено 12 вогнегасників ВП-5(8) [21].

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі, досліджено особливості проблеми ЕМС в мережах до 1000 В з нелінійними споживачами. Також було розглянуто основні джерела вищих гармонік та їх негативний вплив на різні види електроустаткування. Встановлено, що головним джерелом вищих гармонік в мережах до 1000 В є перетворювачі з безтрансформаторним входом, в якості вхідної ланки яких використовується мережний випрямляч з ємнісним фільтром. Показано, що вплив несинусоїдальності напруги і струмів, як правило, призводить, з одного боку, до збільшення втрат напруги і потужності в низьковольтних електричних мережах, а з іншого до порушення нормальної роботи і зменшення терміну служби електроустаткування.

Проведений аналіз існуючих вітчизняних і зарубіжних стандартів у області ЯЕ і ЕМС і відмічена негативна тенденція до збільшенню допустимих меж ПЯЕ в частині несинусоїдальності напруги. Обґрунтований висновок про необхідність вдосконалення власної нормативно-правової бази електротехніків частині нормування емісії гармонійних складових струму для контролю роботи споживача з метою виявлення емітентів погіршень ПЯЕ.

Встановлено, що традиційні схеми заміщення, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струму вищих гармонік, можна використовувати для визначення з достатньою для інженерних розрахунків точністю напруг вищих гармонік в мережах НН. Для цього величину струмів вищих гармонік або форму їх кривих (яку, зокрема, можна одержати експериментально) необхідно приводити у відповідність з конкретною мережею НН. Вказані схеми заміщення мережі НН з нелінійним навантаженням представляється можливим використовувати для розробки наближених оцінних методик, за допомогою яких можна проводити аналіз впливу конкретного нелінійного навантаження на форму кривих струмів і напруг в трифазних мережах з нульовим проводом.

Показано, що розглянуті математичні моделі низьковольтних мереж з

нелінійним навантаженням дозволяють визначити величину спотворень синусоїдальності кривих струмів і напруг мереж НН із зосередженим в одному вузлі навантаженням. Це можуть бути або нерозгалужені автономні мережі з навантаженням, що має в своєму складі радіоелектронну апаратуру з ДВЕЖ з безтрансформаторним входом, або розподільні (міські або сільські) мережі НН, що живлять навантаження крупних об'єктів (будівель, підприємств), яке має в своєму складі нелінійні електроприймачі. Встановлено, що розглянуті моделі не дозволяють визначити величину вищих гармонік струмів і напруг внутрішньої мережі електропостачання будівлі і відповідно, величину спотворень синусоїдальності їх кривих на затисках підключених до неї електроприймачів. Окрім цього, набуті значення несинусоїдальності струмів і напруг зовнішньої живлячої мережі визначаються формально, без конкретизації складу і графіків навантажень окремих груп електроприймачів. Тому для визначення кількісних характеристик несинусоїдальності струмів і напруг в характерних вузлах навантажень внутрішньої мережі будівлі дані моделі необхідно удосконалити шляхом додаткового обліку конкретних параметрів всіх основних елементів його електричної мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арп К., Шнетлер А. Сучасне планування промислових мереж // Енергетика та ринок. – 1997 – С. 25 – 27.
2. ДСТУ ІЕС60050-161: 2003.Словник електротехнічних термінів. Глава 161 Електромагнітна сумісність друк. К. Держспожив стандарт України, 2005 – 60 с.
3. MIL STD 461 Military standard Rtgurmtnt of ektromagnetic chaharacterictics – 269р.
4. MIL STD 462 Militari standard Measurement of elektromagnetic interferens chracterictic – 203р.
5. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. – К.: Вища школа, 1992. – 439 с.
6. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури /В. О. Іванов, Є.І. Гарбусенко, Л.Я. Ільницький, О. А. Щербіна – К.: НАУ , 2014. – 312 с.
7. Буткевич О.Ф., Кириленко О.В., Кузнецов В.Г. Один із аспектів енергетичної безпеки України // Техн. Електродинаміка. – 2003. – С.100 – 103.
8. Зіньковський Ю. Ф. ,Клименко В. Г. Електромагнітна інформація на захищеність та сумісність електронних апаратів. – Житомир: ЖІТІ, 1999. – 376 с.
9. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття // Під ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка.- Київ: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 400 с.
10. Електромагнітна сумісність електропостачання, . Підручник /І. В. Жежеленко, А, К, Шидловський, Півняк Г. Г., Ю. П. Саєнко .Д. Нац. гірн. у-тет. 2009 – 319 .с.
11. Енергозабезпечення електронної апаратури Практикум навчальний посібник В.В. Пілінський, М.В. Радіонова, О.І Рибін; за ред. Пілінського В.В. – К. Вища школа, 2020. – 550 С.
12. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

13. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

15. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

16. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К: Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

17. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

18. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К: МВС України, 2014. 47 с.

19. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

20. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

21. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

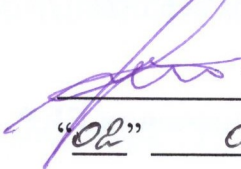
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«02» 04 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

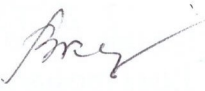
на бакалаврську дипломну роботу

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ
ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

08-24.БДР.006.00.000 ТЗ

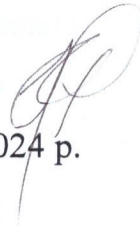
Керівник роботи

д.т.н., проф.,

 Василь КУТІН

«02» 04 2024 р.

Виконав: ст. гр. 1ЕМ-206

 Олександр КИЛАВЧУК

«02» 04 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000В з нелінійним навантаженням».

Скорочене найменування розробки – «Вплив нелінійного навантаження на показники мережі».

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських кваліфікаційних робіт.

3 Мета і призначення БКР

Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням дозволяє розробити засоби, що підвищують рівень безпеки, надійності та ефективності використання мережі при її експлуатації. Призначення-розвиток теорії електромагнітної сумісності процесів в розподільних мережах напругою до 1000 В. Вихідні дані :конструктивне виконання та режими роботи розподільної мережі напругою до 1000В з нелінійним навантаженням

4 Джерело розробки

1. Арп К., Шнетлер А. Сучасне планування промислових мереж // Енергетика та ринок. – 1997 – С. 25 – 27.
2. ДСТУ ІЕС60050-161: 2003.Словник електротехнічних термінів. Глава 161 Електромагнітна сумісність друк. К. Держспожив стандарт України, 2005 – 60 с.
3. MIL STD 461 Military standard Rtgurmtnt of ektromagnetic chaharacterictics – 269p.
4. MIL STD 462 Militari standard Measurement of elektromagnetic interferens chracterictic – 203p.
5. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. – К.: Вища школа, 1992. – 439 с.
6. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури /В. О. Іванов, Є.І.

Гарбусенко, Л.Я. Ільницький, О. А. Щербіна – К.: НАУ, 2014. – 312 с.

7. Буткевич О.Ф., Кириленко О.В., Кузнецов В.Г. Один із аспектів енергетичної безпеки України // Техн. Електродинаміка. – 2003. – С.100 – 103.

8. Зінковський Ю. Ф. ,Клименко В. Г. Електромагнітна інформація на захищеність та сумісність електронних апаратів. – Житомир: ЖІТІ, 1999. – 376 с.

9. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття // Під ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка.- Київ: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 400 с.

10. Електромагнітна сумісність електропостачання, . Підручник /І. В. Жежеленко, А, К, Шидловський, Півняк Г. Г., Ю. П. Саєнко .Д. Нац. гірн. у-тет. 2009 – 319 .с.

11. Енергозабезпечення електронної апаратури Практикум навчальний посібник В.В. Пілінський, М.В. Радіонова, О.І Рибін; за ред. Пілінського В.В. – К. Вища школа, 2020. – 550 С.

5 Етапи і терміни виконання роботи

- 1.Збір інформації яка необхідна для дослідження.
- 2.Результати аналізу вітчизняних і зарубіжних стандартів в області якості електроенергії і електромагнітної сумісності.
- 3.Традиційні схеми заміщення , в яких нелінійне навантаження задаться джерелом струму вищих гармонік.
- 4.Математичні моделі мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням для визначення кількісних характеристик несинусоїдальних струмів і напруг в характерних вузлах навантажень мережі.
- 5.Розробка таблиць і креслень. Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист БКР.

6 Матеріали, що подаються до захисту

Пояснювальна записка БКР, графічні та ілюстративні матеріали.

7 Порядок контролю та захисту БКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисту та захисту

8 Техніко економічне обґрунтування

Визначено, що в даний час електричні мережі житлових і громадських будівель піддаються інтенсивній дії вищих гармонік струму і напруги, що в умовах широкомасштабного використання, в першу чергу, комп'ютерної техніки викликає гостру необхідність в поліпшенні ЯЕ і забезпеченні ЕМС споживачів вказаних низьковольтних мереж

9.Очікуваний економічний ефект

Потрібно забезпечити на стадії проектування: надійність, контролепридатність, технічну досконалість; на стадії виготовлення бездефектну технологію, безпеку праці; на стадії експлуатації надійність, безпеку і ефективність використання за призначенням.

10 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється у відповідності з Правилами технічної експлуатації інженерно-технічним персоналом та електромонтером четвертого розряду. Ремонти здійснюють спеціалізовані бригади - електромонтерами відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється після кожного спрацювання.

11 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконане напругою 0,4кВ від силової мережі підприємства.

Додаток Б

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ ДО 1000 В З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

АКТУАЛЬНІСТЬ

► **Актуальність теми.** Зростання потужності нелінійних, а також несиметричних і різко змінних навантажень промислових підприємств призвело до істотного збільшення рівня електромагнітних впливів як в системах електропостачання підприємств, так і енергетичній системі. Ці впливи, в залежності від їх характеру, інтенсивності та тривалості, несприятливо впливають на силові електроустановки, системи автоматики та релейного захисту, телекомунікації, а також на електрообладнання малих груп споживачів. Зараз існує декілька принципів вимірювання якості електричної енергії, але єдина методика перевірки якості поки що не сформована. Також немає приладів для вимірювання нелінійних змін в електричній системі.

► **Мета і призначення БКР.** Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням дозволяє розробити засоби, що підвищують рівень безпеки, надійності та ефективність використання мережі при її експлуатації. Призначення - розвиток теорії електромагнітної сумісності процесів в розподільних мережах напругою до 1000 В.

АКТУАЛЬНІСТЬ

► **Основними задачами, відповідно, є:**

- 1. Дослідження вже відомих методів моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000 В з нелінійним навантаженням.
- 2. Розвиток теорії електромагнітної сумісності процесів в розподільних мережах напругою до 1000 В.
- 3. Розглянути математичні моделі низьковольтних мереж з нелінійним навантаженням.
- 4. Проаналізувати існуючі вітчизняні і зарубіжні стандарти в області якості електроенергії і електромагнітної сумісності.

ПРИЧИНИ ПОРУШЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСТНОСТІ В МЕРЕЖАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

- Відомо, що переважна більшість електроприймачів, що підключаються до мереж НН, є однофазними і має випадкові графіки навантажень. Внаслідок цього у будь-який момент часу в мережі має місце несиметрія навантажень по фазах і відповідна несиметрія струмів. При цьому слід розрізняти несиметрію струмів, визначену нерівномірним підключенням електроприймачів по фазах (невипадкова несиметрія), і несиметрію, викликану випадковими обставинами (вірогідність несиметрії).
- В даний час в низьковольтних мережах житлових і громадських будівель набули широке поширення нелінійні електроприймачі порівняно невеликої потужності, причому існує тенденція до безперервного збільшення їх кількості. Не дивлячись на малу потужність цих споживачів електроенергії, їх масове застосування є причиною значних спотворень синусоїдальності кривих напруг в мережах до 1000В з нелінійним навантаженням.

АКТУАЛЬНІСТЬ ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА РІЗНІ ВИДИ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

Вплив несинусоїдальності напруг і струмів на роботу електроустаткування відчувається практично у всіх країнах з розвиненою промисловістю і, як правило, призводить, з одного боку, до збільшення втрат напруги і потужності в мережах, зменшенню їх пропускної спроможності, а з іншою - до порушення нормальної роботи і зменшення терміну служби електроустаткування, зниженню продуктивності праці, а також кількості і якості продукції, що випускається. Наприклад, відомо, що при допустимих значеннях несиметрій напруги 2% і несинусоїдальності 5% термін служби асинхронних двигунів скорочується на 21%, синхронних - на 32%, трансформаторів - на 8%, конденсаторів - на 40%.

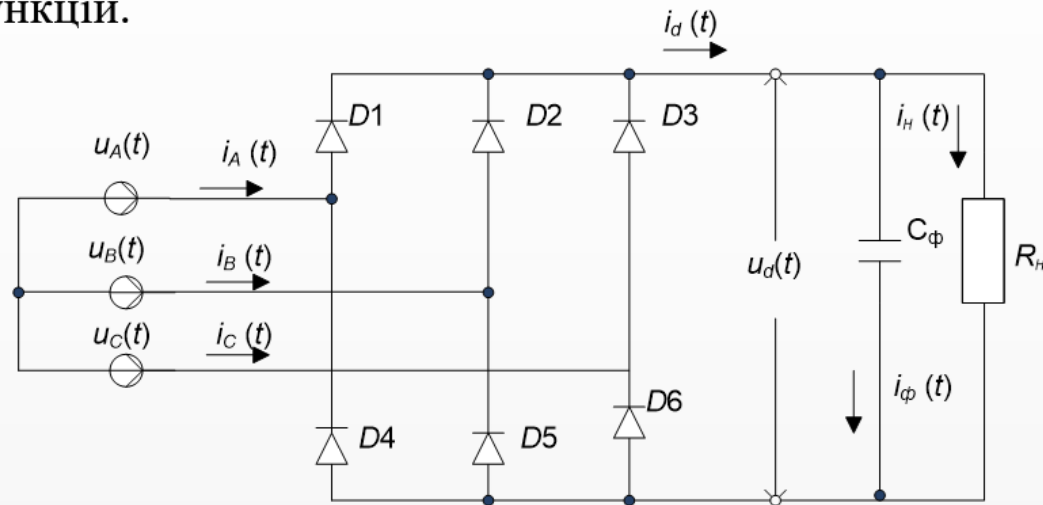
ОЦІНКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

Допустимі значення струмів вищих гармонік відповідно до стандарту IEEE 519.

Номер гармоніки	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
$20 < I_{SC}/I_L < 50$	7	7	7	7	3,5	3,5	3,5	2,5	2,5	2,5	1	1	1
$50 < I_{SC}/I_L < 100$	10	10	10	10	4,5	4,5	4,5	4	4	4	1,5	1,5	1,5
$100 < I_{SC}/I_L < 1000$	12	12	12	12	5,5	5,5	5,5	5	5	5	2	2	2
$I_{SC}/I_L > 1000$	15	15	15	15	7	7	7	6	6	6	2,5	2,5	2,5

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Математична (аналітична) модель трифазних мостових випрямлячів із застосуванням комутаційних функцій.



Трифазна мостова схема випрямляча з місткістним фільтром

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК СТРУМІВ ТА НАПРУГ МЕРЕЖ НН З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Залежності коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої K_U і n -ої гармонійної складової $K_{U(n)}$ напруги від величини частки випрямного навантаження.

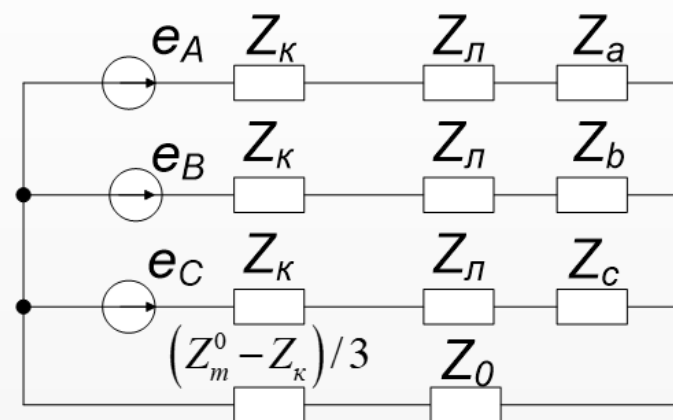
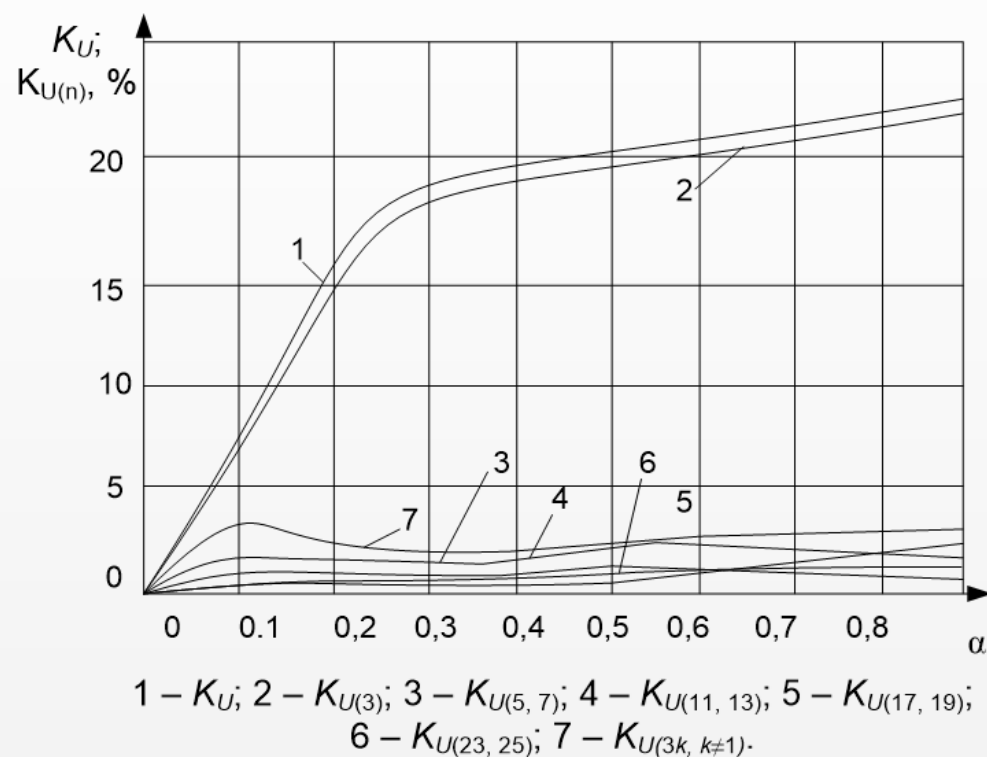
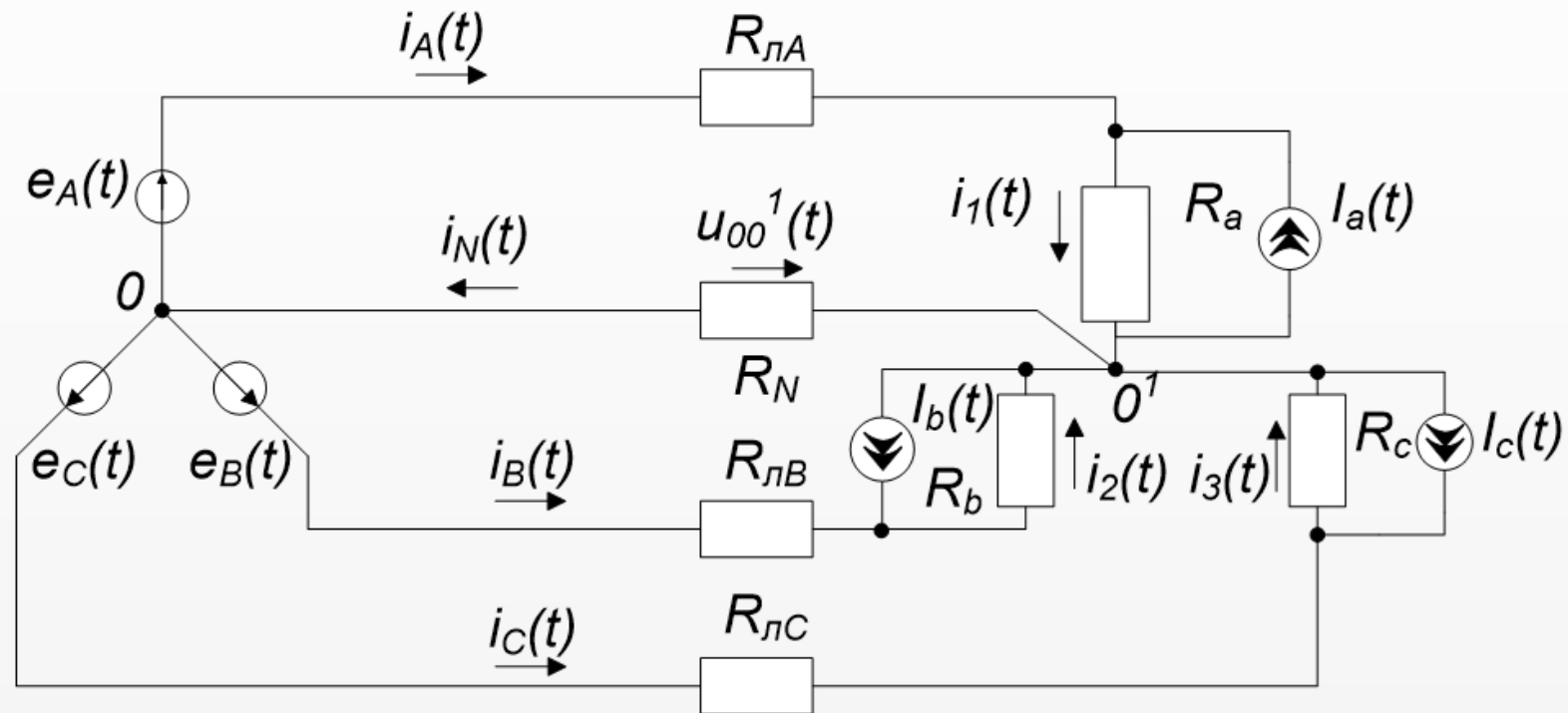


Схема заміщення мережі НН

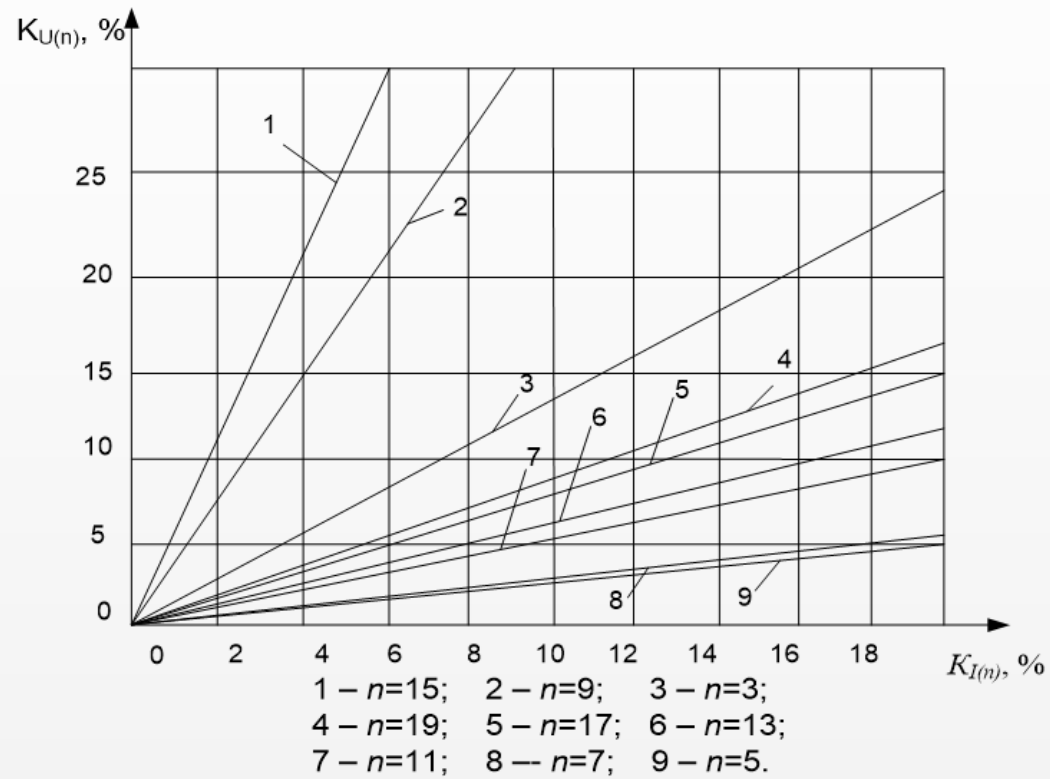
МОДЕЛІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ, В ЯКИХ НЕЛІНІЙНІ НАВАНТАЖЕННЯ ЗАДАЮТЬСЯ ДЖЕРЕЛАМИ СТРУМІВ

Трифазна схема заміщення мережі НН з джерелами струмів нелінійних навантажень.



АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЕЛИЧИН ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ І НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРАДИЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

Залежності $K_{U(n)}$ від $K_{I(n)}$ для одного з конкретних варіантів
виконання мережі НН



ВИСНОВКИ

- Розглянуто основні джерела вищих гармонік та їх негативний вплив на різні види електроустаткування.
- Проведений аналіз існуючих вітчизняних і зарубіжних стандартів у області якості електроенергії, і електромагнітної сумісності та відмічена негативна тенденція до збільшенню допустимих меж показників меж електроенергії в частині несинусоїдальності напруги.
- Показано, що вплив несинусоїдальності напруги і струмів, як правило, призводить, з одного боку, до збільшення втрат напруги і потужності в низьковольтних електричних мережах, а з іншого до порушення нормальної роботи і зменшення терміну служби електроустаткування.
- Встановлено, що традиційні схеми заміщення, в яких нелінійне навантаження задається джерелами струму вищих гармонік, можна використовувати для визначення з достатньою для інженерних розрахунків точністю напруг вищих гармонік в мережах до 1000 В з нелінійним навантаженням.
- Показано, що розглянуті математичні моделі низьковольтних мереж з нелінійним навантаженням дозволяють визначити величину спотворень синусоїдальності кривих струмів і напруг мереж до 1000 В з нелінійним навантаженням із зосередженням в одному вузлі навантаженням.

Додаток В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000В з нелінійним навантаженням

Тип роботи: бакалаврська дипломна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. 1 ЕМ-206

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кутін В.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність	88,8 %
Схожість	11,2 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Киравчук О.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кутін В.М.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БДР.006.00.000				
					Моделювання та аналіз режимів роботи мереж напругою до 1000В з нелінійним навантаженням	Літ.		Маса	Масштаб
Розробив:	Киравчук О.В.		28.05						
Перевірив	Паянок О.А.		28.05						
Т. контр.									
Перевірив	Кутін		28.05	Аркуш		Аркушів			
Решен зентерешевих			28.05	ВНТУ, гр.1 ЕМ-206					
Норм.кон.	Важко		28.05						
Затверд.	Мошноріз М.М.		28.05						