

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.

ДИПЛОМНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження схеми розподільних мереж
системи електропостачання м. Суми»

Виконав

(підпис)

Колесник О.О.
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301-1м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Чепіжний А.В.
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент _____ Чепіжний А.В.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«_____» _____ 202__ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Колесник Олег Олексійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження схеми розподільних мереж системи електропостачання м. Суми

керівник роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» 02 2024 р. № 572/ос

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи «11» 11 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики елементів мережі, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Аналіз особливостей розподільчих мереж системи електропостачання.

2 Визначення основних шляхів по зменшенню несиметрії в схемах електричних мереж міста Суми.

3 Дослідження несиметричних режимів мережі засобами комп'ютерного моделювання.

4 Охорона праці.

5 Розрахунок економічного ефекту від зниження втрат електричної енергії.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (Колесник О.О.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник
дипломної роботи**

_____ (Чепіжний А.В.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Дослідження схеми розподільних мереж системи електропостачання м. Суми. Магістерська робота / Колесник Олег Олексійович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 51 с.

В роботі проведено аналіз існуючої схеми розподільчої мережі, що використовується в системі електропостачання міста Суми. Для даної схеми проведено аналіз основних параметрів їх роботи.

Виконано аналіз основних несприятливих факторів роботи електромережі, до яких відносяться втрати електроенергії та несиметричних режимів роботи.

В роботі проведено аналіз несиметричних режимів роботи в електричних мережах. Визначено природу та походження несиметрії в лініях електропередачі та в різному електричному обладнанні. Також проведено аналіз впливу несиметрії напруги та струму на показники роботи різноманітних систем електропостачання.

В результаті виконано аналіз методів та засобів боротьби з несиметрією в електричних мережах та електричних машинах. Наведено та виконано відповідні показники ефективності запропонованих рішень.

Виконано розрахунки запропонованої лінії електропередачі для запропонованої нами лінії з усунутими проблемами несиметрії.

Проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів з точки зору дотримання заходів з охорони праці. Проведено економічний розрахунок запропонованої лінії електропередачі.

Ключові слова: несиметрія, напруга, струм, електричні машини, асинхронний двигун, технічні засоби, розподільчі пристрої, симетрувальні установки.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	8
1.1 Особливості втрат електричної енергії в розподільчих мережах міста.....	10
1.2 Особливості роботи розподільчих електричних мереж.....	11
1.3 Особливості впливу несиметрії параметрів мережі на загальну роботу схеми електропостачання м. Суми.....	20
Висновок до розділу.....	23
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ПО ЗМЕНШЕННЮ НЕСИМЕТРІЇ В СХЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ МІСТА СУМИ.....	24
2.1 Особливості визначення несиметричних режимів роботи електричної мережі.....	24
2.2 Пропозиції по способам та рішенням зниження несиметрії для схеми електропостачання міста.....	27
Висновок до розділу.....	34
3 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	35
3.1 Робота з програмою Multisim.....	35
3.2 Розрахунок режиму мережі 0,38 кВ та 10 кВ за допомогою програмного продукту Multisim.....	40
Висновок до розділу.....	43
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
Висновок до розділу.....	45

5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	46
5.1 Розрахунок капітальних вкладень мережі 0,4 кВ.....	46
Висновок до розділу.....	48
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	50

ВСТУП

Актуальність теми. В великих, середніх та малих містах використовуються різноманітні схеми електропостачання. При цьому формування даної системи виконувалось на етапі їх електрифікації з врахуванням особливостей подальшої реконструкції. Виходячи з цього для кожного міста схема електропостачання вже є визначенню та потребує дослідження основних параметрів її роботи в даних умовах.

Необхідно враховувати також використання подальшої реконструкції та розбудови основних районів міста. Виходячи з цього основними розподільними мережами є мережі 6-10 кВ для міста Суми. Виходячи з цього основними проблемами, що виникають в даних мережах є втрати електричної енергії, що напряму пов'язані з подальшим розгалудженням мережі. Також додатково необхідно враховувати особливості несиметричних режимів роботи в електричній мережі.

Вирішення даних питань в дослідженні схем розподільчих мереж дозволяє виконати аналіз їх ефективності. Виходячи з цього можна зробити висновок, що дослідження схем розподільчих мереж міста Суми полягає саме в вирішенні питання виникнення втрат електроенергії та питань несиметричних режимів роботи, а отже дана тема є актуальною та потребує подальших досліджень. Дослідження потрібно проводити систематично через те, що спостерігається постійна зміна електрообладнання та устаткування, що працює в розподільчих мережах міста.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження основних показників ефективності роботи схем розподільчих мереж міста Суми.

Для проведення дослідження нами пропонується вирішити наступні задачі:

1. Визначити основну схему розподільчих мереж електропостачання міста Суми.
2. Визначити основні показники для опису ефективності роботи розподільчої мережі.

3. Запропонувати заходи по зменшенню втрат електроенергії та несиметричних режимів роботи мережі.

Об'єктом дослідження в роботі є схеми розподільчих мереж міста Суми з напругою 6-10 кВ.

Предметом дослідження в роботі є основні показники роботи електричної розподільчої мережі міста Суми, що описують величину втрат електроенергії та несиметрію напруги та струму мережі.

Методи дослідження. Основними методами проведення дослідження є математичні методи та методи комп'ютерного моделювання. Також додатково застосовувались графічні методи побудови електричних мереж.

Практичне значення отриманих результатів полягає в визначенні основних режимів роботи схем розподільчих мереж м. Суми з визначенням показників їх роботи, а саме втрат електроенергії та визначенні величини несиметрії.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Аналізуючи систему електропостачання міста необхідною умовою є розуміння загальних принципів її побудов. При цьому система електропостачання м. Суми є доволі складною та складається з електричних мереж 220-35 кВ, 6-10 кВ та електричних мереж до 1 кВ. Саме напруга 6-10 кВ в мережі електропостачання м. Суми є розподільчими мережами.

Загалом існують схеми розподільчих мереж різні за переліком показників. В місті мережі 6-10 кВ становлять фактично два типи мереж: розподільчі та живлячі. Виходячи з цього основною характеристикою розподільчих мереж є мережа що починається від ввідного пристрою до розподільчих пристроїв чи щитків.

Основними проблемами різноманітних схем розподільчих електричних мереж є несиметрія напруги по фазам, а отже потрібно проводити контроль даного показника. Іншою не менш важливою проблемою розподільчих електричних мереж є втрати електричної енергії різного характеру. Виходячи з цього доцільно провести аналіз основних втрат електричної енергії та провести аналіз особливостей втрат електричної енергії саме для міста Суми.

При цьому основною особливістю розподільчих мереж міста є вибір схеми мережі з визначенням перспективних рівнів в розрахунку на 5 років. Також необхідно зауважити, що на сьогодні найбільш розповсюдженою схемою розподільчих мереж є двопроменева електрична мережа (рис. 1.1).

Дана схема живлення забезпечує передачу електричної енергії від РП-10кВ до кожної з ТП-0,4 кВ до яких підключено подальші лінії. При побудові міст попередньо потрібно враховувати розташування всіх підстанцій та ліній електропередачі та їх довжини.

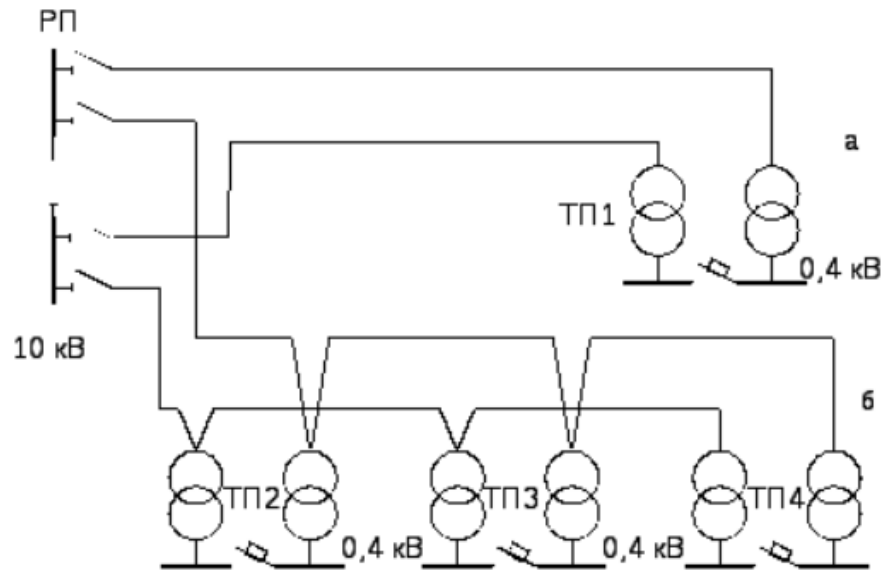


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд двопроменевої розподільчої електричної мережі 6-10 кВ

Необхідно заострити увагу на тому, що в даних електричних мережах доволі сильно зростає реактивна потужність при їх роботі. Необхідно зазначити, що сьогодні споживання реактивної потужності різноманітними підприємствами знаходиться на рівні 60-70 %, що визначається від величини активної. При цьому м. Суми має в своїй структурі доволі велику кількість підприємств, що працюють та можуть поглинати реактивну потужність для своїх виробничих процесів. Необхідно зазначити, що більшість процесів врегульовують кількість реактивної електричної енергії в мережі.

Оскільки найбільше проблем в розподільних електричних мережах виникає через втрати електричної енергії та несиметричні режими роботи. При цьому загальна ситуація з пошкодженням розподільних електричних мереж призводить до значних пошкоджень та збільшення впливу на дані показники.

Розподільчі мережі 6-10 кВ розраховують виходячи з показників надійності, економічності, якості напруги та подальшого розвитку. При цьому станом на сьогодні враховувати показники надійності доволі складно через складнощі в енергетичній сфері. Поняття економічності відходить також на другий план в порівнянні з необхідністю відновлення забезпечення електричною енергією великої кількості споживачів області та міста.

Виходячи з цього необхідний показник для проведення аналізу є якість напруги в електричній мережі.

1.1 Особливості втрат електричної енергії в розподільчих мережах міста

Втратами є певна різниця між електричною енергією, що відпущена в електричну мережу та електричної енергії, що надійшла до споживача. Фактично втрати електричної енергії виникають навіть у випадках простого підключення до мережі електроприладів чи різноманітному обладнанні. При цьому втратами вважаються також і крадіжки електричної енергії різноманітними користувачами електричної мережі.

Виходячи з цього втрати електричної енергії поділяють на фізичні та технічні. До фізичних втрат відносять крадіжки з підключенням до приладів обліку електричної енергії чи безпосередньо до електричної мережі та інше. До технічних втрат відносять втрати на власну роботу підстанцій та інших елементів мережі, що потребує живлення для забезпечення її функціонування.

В електричних мережах для визначення втрат електричної енергії на першочерговому рівні організована система обліку електричної енергії. При цьому необхідно враховувати, що всі прилади обліку мають певну похибку, що також відноситься до технічних втрат електричної енергії.

Для подальшого аналізу втрат електричної енергії пропонується провести зведення в загальну систему класифікації втрат електроенергії (рис. 1.2).

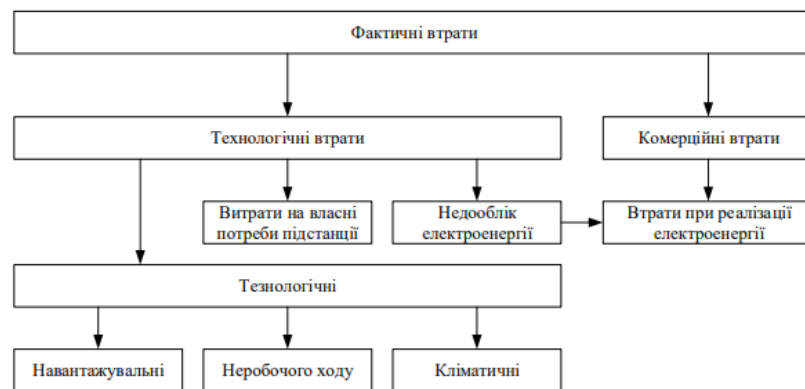


Рисунок 1.2 – Загальна структура витрат електроенергії

Виходячи з рисунку 1.2 фактичні втрати поділяють на технологічні та комерційні. І відповідно до подальшої класифікації комерційні втрати виникають саме при реалізації електричної енергії та частково з її недообліком. Більш складний розподіл входить в технологічні втрати. Їх враховують при проведенні обліку електричної енергії.

Доцільно також сказати, що втрати в міських розподільних мережах можна поділити за їх структурою (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Діаграма структури втрат електроенергії в мережі 6-10кВ міста Суми

З діаграми рисунку 1.3 бачимо, що найбільший відсоток втрат припадає саме на втрати на навантаження в мережі 6-10 кВ. Із цього слідує, що активне значення складової опору є більшим лінії порівняно з трансформаторами. Також в електричній мережі міста спостерігається доволі високе завантаження електрообладнанням. Подібне перевантаження сприяє збільшенню реактивної складової потужності в даній мережі.

1.2 Особливості роботи розподільчих електричних мереж

Як зазначалось вище, однією з основних проблем розподільчих електричних мереж є несиметрія напруги, а отже пропонується розглянути особливості її виникнення в електричній мережі міста Суми.

Несиметричним режимом роботи є режим при якому в усіх фазах за параметрами є не однаковими. Несиметричні режими роботи виникають в основному в трифазних електричних мережах за умови відсутності контролю по підключенню до кожної конкретної фази. В трифазній мережі несиметрію поділяють на короткочасну та тривалу. Несиметричні режими можуть називатись експлуатаційними адже їх виникнення супроводжується експлуатацією електрообладнання в електричній мережі.

Несиметрію викликають також різноманітні аварійні процеси в електричних мережах. Це такі як обриви проводів, різного роду короткі замикання, відключення фаз в однофазових автоматах з повторною системою включення та інше. Всі ці процеси викликають несиметрію, що є короткочасною.

За умови несиметрії в певному елементів з системи електропостачання може виникати несиметрія, що є тривалою. Тривала несиметрія виникає також за умови виконання несиметричних підключень навантаження.

Для визначення основних причин виникнення несиметричних режимів роботи в електричній мережі необхідно провести відповідний аналіз. Отже несиметрія при електропостачанні в електричній мережі виникають через:

- утворення неоднакової величини по навантаженню на різних фазах трифазної мережі;
- неповне значення фазної роботи або роботи інших елементів, що під'єднуються до електромережі;
- відхилення різноманітних параметрів на кожній з фаз електромережі.

Неоднаковість величини навантаження на різних фазах фактично є основною причиною, що спричиняє виникнення несиметрії величини напруги.

Для розподільчих мереж та мереж 0,38 кВ несиметрія виникає в основному через підключення приладів освітлення та електричних приладів незначної потужності. Оскільки чисельно даних електроприладів велика кількість то виникає певна проблема поділу навантаження по фазам. Для зменшення величини несиметрії напруги необхідною умовою є виконання розподілу між навантаженнями різних фаз.

На сьогодні існує певний розподіл несиметрії на дві групи за їх типами:

- систематичний тип несиметрії;
- ймовірнісний тип несиметрії.

Ймовірнісний тип додатково називають ще випадковим типом несиметрії.

Для вирівнювання фазного навантаження виконують перемикання на фазу, яка по значенню навантаження є незавантаженою. В результаті виконується зміна навантаження з максимально завантаженої фази трифазної електричної мережі. В основному даний варіант вирішення проблеми використовується для систематичної несиметрії.

Випадкова несиметрія виникає за умови почергового завантаження різних фаз. При цьому перевантаження відбувається на різних фазах – то на одній то на іншій. Боротьба з даним типом несиметрії є дещо складнішою. Вирішення даної проблеми потребує застосування установок для виконання симетрування. Дані установки є автоматичними та працюють без втручання операторів.

Неповнамірна фазна робота великої кількості елементів електромережі виникає через короточасні фазні відключення. Необхідно зазначити, що відключення можуть бути не лише однієї фази, а і одночасно декількох фаз. Причинами подібного відключення можуть бути різноманітні короткі замикання. Також причинами неповномірної фазної роботи можуть бути і тривалі відключення для проведення різноманітних видів обслуговування чи ремонтів.

Подібна проблема доволі часто вирішується за допомогою встановлення установок для виконання пофазного управління. Робота таких установок полягає у відключенні фазної лінії електропередачі, що є пошкодженою. Але випадки подібного відключення виникають в результаті коротких замикань за умови коли не успішною є робота АПВ.

Необхідно також розділяти несиметрію на повздовжню та поперечну. Повздовжня несиметрія це несиметрія, що виникає в лініях електропередачі. Повздовжня несиметрія за своїми ознаками характеризує неповнофазність

роботи, що спричинені ремонтом окремих фаз лінії електропостачання. Також поздовжня несиметрія може бути викликана ремонтами і іншого обладнання на лінії. Додатково також даний вид несиметрії виникає в результаті післяаварійних робочих режимів при яких у трифазній мережі відключається лише одна фаза, що є пошкодженою.

Поперечна несиметрія виникає в результаті несиметричності величини навантаження. Вона виникає в більшості випадків поперечна несиметрія на різноманітних підприємствах м. Суми. На даних підприємствах електроприймачі з симетричним виконанням трьох фаз неможливе. При цьому бувають ситуації, з неможливістю симетричного підключення через недоцільність. Подібними установками є різноманітні апарати зварювання, печі електричні та інше устаткування подібного характеру. При цьому на території м. Суми розташовано доволі велику кількість різноманітних підприємств з подібними установками, це підприємства металургії та виробництва різноманітного обладнання.

Іншою причиною виникнення несиметрів в розподільних електричних мережах 6-10 кВ є підключення до трифазної мережі великої кількості однофазних споживачів, що на сьогодні є поширеним явищем. Подібну ситуацію можна бачити на більшості промислових підприємств м. Суми.

Подібні ситуації постійно майже приводять до несиметрії значення навантаження. В результаті чого виникають доволі великі струми в нульовому проводі мережі.

Необхідно зазначити, що всі ці параметри в значній мірі впливають на якісні показники електричної енергії в мережі та здатні наносити значні збитки підприємствам та різним споживачам.

В загальному випадку несиметрія є певною комбінацією двох типів несиметрії повздовжньої та відповідно поперечної, а отже є доволі складним явищем.

За умови несиметрії в трифазній мережі виникають різноманітні струми та величини напруг, що мають зворотню чи навіть нульову

послідовність. Даний ефект має значний негативний вплив на роботу електрообладнання та різноманітного устаткування.

В електричних машинах струми зі зворотною послідовністю сприяють виникненню магнітних полів синхронного характеру. Дане явище сприяє додатковому нагріву різноманітних електродвигунів, а також призводить до зниження моментів виконання обертання електродвигуна. В результаті подібного явища виникає трикутник значень напруги для споживачів та на відповідних шинах від генераторів.

В загальному випадку струми з послідовністю, що є нульовою призводять до виникнення несиметрії величини напруги фаз. При цьому подібна несиметрія має також вплив на лінії розміщені поблизу, що в загальному випадку є негативним. Подібними лініями можуть бути різноманітні лінії виконання зв'язку.

Наявність та величина несиметрії значень напруги чи значення струму в загальному випадку описують якісні показники електроенергії. Характеризуються дані процеси в основному коефіцієнтом врахування нульової величини послідовності за значенням напруги чи значення струму. Також існує характеристика відповідно до коефіцієнта врахування зворотної послідовності.

Коефіцієнт врахування величини нульової послідовності за значенням напруги чи значення струму (K_{0U}) є величина що визначається відношенням значення напруги з нульової послідовності до величини фазного значення напруги з прямої послідовності. Подібні коефіцієнти враховуються лише для багатофазних типів електромереж.

Коефіцієнт врахування зворотного значення послідовності величини напруги (K_{2U}) визначається відношенням значення напруги в зворотній послідовності до значення напруги в величині прямої послідовності. Подібні коефіцієнти враховуються лише для багатофазних типів електромереж.

Необхідно також зазначити, що дані коефіцієнти враховуються як для величини навантаження так і для значень струмів, з однаковими залежностями.

Для визначення коефіцієнта з врахуванням зворотної послідовності величини напруги необхідно скористатись даним рівнянням:

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном}}, \quad (1.1)$$

де U_2 – величина напруги, що є діючою та в зворотній послідовності, В;

$U_{ном}$ – величина напруги, що є номінальним та діючим, В.

Для визначення коефіцієнту врахування величини нульової послідовності значення напруги необхідно використати рівняння:

$$k_{0U} = \frac{U_0}{U_{ном}}, \quad (1.2)$$

де U_0 – значення, що є діючим для величини напруги в нульовій послідовності;

$U_{ном}$ – значення, що є діючим для величини номінальної напруги.

Ефект несиметрії в трифазних мережах виникають через процеси по накладанню значень в прямій послідовності величини напруги та значення в зворотній послідовності. Такий процес призводить до зміни величини напруги в лінійних чи фазних значеннях.

Для аналізу трифазної електричної мережі необхідною умовою є побудова векторних діаграм. Так на рисунку 1.4 наведено векторну діаграму подібного характеру.

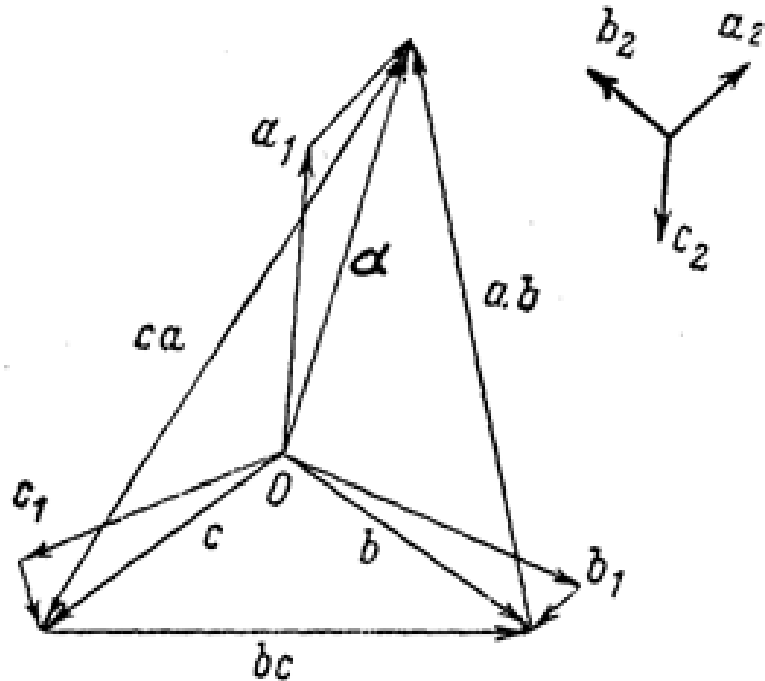


Рисунок 1.4 – Графічне представлення векторної діаграми трифазної мережі

В трифазній електричній мережі виникає два типи несиметрії. Перша викликана зміною величини напруги в загальній системі, що має зворотню послідовність. Друга – несиметрія викликана накладанням значення напруги з нульовою послідовністю саме значення прямої послідовності. В результаті в такій мережі виникає явище зсуву нейтралі, що і викликає несиметрію величини напруги за умови збереження міжфазного значення напруги в симетричному режимі.

Даний процес можна зобразити графічними методами, коли відбувається накладання системи, що має нульову провідність на систему з прямою послідовністю. На рисунку 1.5 наведено графік у векторному вигляді подібного процесу.

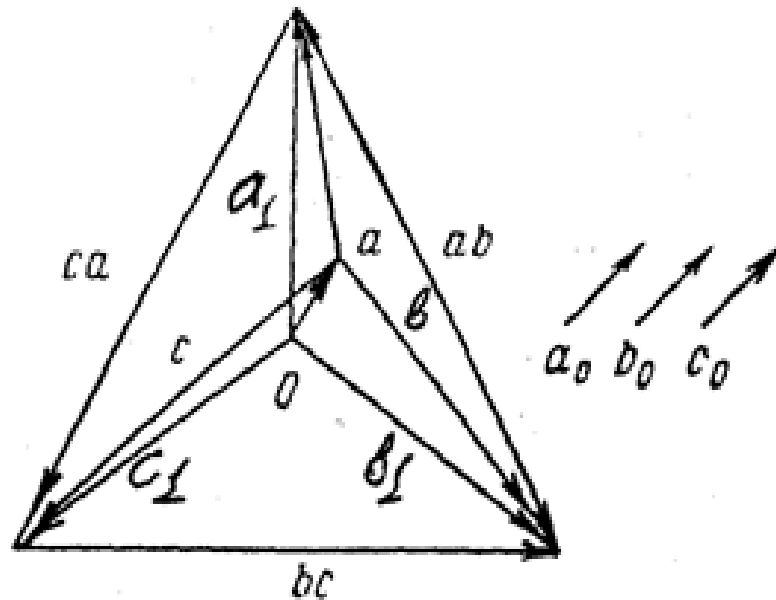


Рисунок 1.5 – Векторний вигляд накладання систем з нульовою та прямою послідовностями

Ріст та наявність в мережі несиметрії значень напруги чи значень струмів призводить до зростання кількості втрат величини потужності по лінії електропостачання. Також ріст втрат потужності спостерігається і в трансформаторах. Дане явище додатково призводить до зменшення пускової здатності трансформаторів. При цьому негативний вплив здійснюється також і на генератори синхронного типу, де виникає значне нагрівання ротора і статора. Всі ці проблеми виникають попередньо через несиметрії напруг, що підсилює інші процеси в електричній мережі.

Негативний вплив несиметрії в електричній мережі додатково приводить до зменшення показників надійності різноманітного електрообладнання. В асинхронних електродвигунах в результаті подібних процесів виникають зниження моментів на валу, що є корисними. Все це призводить до виникнення перегріву елементів двигуна з подальшим старінням його ізоляції, що є швидкими. Все це значною мірою прискорює основні поломки електродвигунів.

На сьогодні досліджено, що при коефіцієнті врахування значення напруги $k_{2U} = 4\%$ спостерігається зниження терміну експлуатації майже в два рази.

Зазначимо, що загалом відхилення напруги в трифазній електромережі, що викликано несиметрією призводить до значного пониження ефективної роботи різноманітних споживачів, що є трифазними. При цьому найбільш страждають різноманітні люмінесцентні лампи чи інші типи ламп.

Оскільки несиметрія значно впливає на різноманітні освітлювальні прилади то необхідно зазначити, що в них спостерігається значне зниження їх строку використання.

Також подібні процеси доволі сильно впливають на надійність показників роботи пристроїв в електромережі. Відповідно до цього в показниках якості для електроенергії є певне обмеження величини коефіцієнту врахування зворотної послідовності до значення 2 %. На дане значення виконується вибір засобів для проведення компенсації, фільтрів та пристроїв для виконання симетрування.

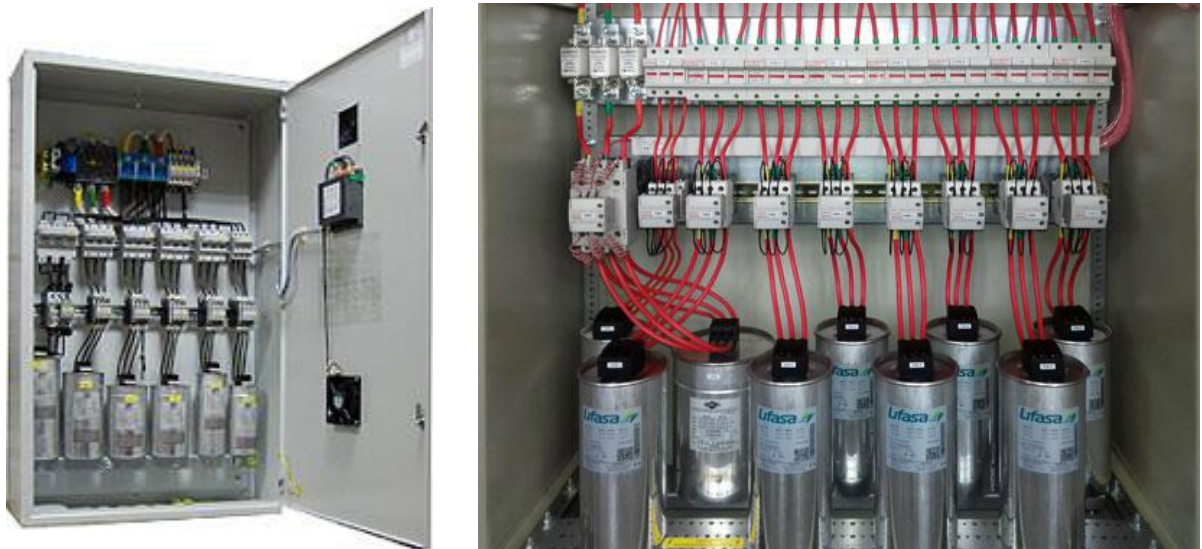


Рисунок 1.6 – Установки для компенсації реактивної потужності

Також слід зазначити, що використовуються сьогодні в електричних мережах м. Суми трифазні симетрувальні установки з вмонтованими елементами ємності. Необхідно зазначити, що також застосовуються

різноманітні елементи з двома ємностями та максимум двома елементами для індукції.

Необхідно зазначити, що існують також і двофазні системи симетрування з наборами елементів ємності та індукції. Виходячи з цього кращим варіантом є саме двофазні системи з двома елементами ємності та індукції. Перевагами подібної системи є дешевизна порівняно з іншими системами.

Виходячи з вищенаведеного загальна робота по виконанню симетрування напруги в електричній мережі зводиться лише до проведення компенсації значень струму та напруги та підтримання їх в номінальних значеннях.

1.3 Особливості впливу несиметрії параметрів мережі на загальну роботу схеми електропостачання м. Суми

Як зазначалось вище виникнення коливань значень струму та значень напруги, що характеризуються певними зворотними чи нульовими значення послідовності призводять до виникнення додаткових затрат величини потужності в мережі. При цих процесах додатково спостерігаються втрати електричної енергії та відповідно напруги в електричній мережі. Зміна всіх показників доволі сильно впливає на технологічні та економічні показники роботи електричної мережі.

Додатково необхідно сказати, що виникнення струмів з нульовою та зворотною типами послідовностей ведуть до зростання втрат по довжині гілок електричної мережі. За таких же параметрів величин напруги а також струму для нульової та зворотної послідовностей приводять до втрат електроенергії в її поперечних гілках.

При накладанні нульового типу послідовності на зворотний тип послідовності викликає відхилення величини напруги, що мають додатковий характер. Основною причиною подібних змін є вихід значень напруги в мережі за певні їх параметри. Такий же ефект спостерігається і при накладанні

струмів зворотного та нульового типів послідовностей але цей процес має протікати в різних фазах трифазної мережі.

Загальним результатом виникнення даного процесу спричиняє загальне зниження умов для пропускної здатності електричної мережі.

Найбільш часто несиметрія напруги виникає через певні несиметричні навантаження в електромережі. При цьому значення струмів несиметрії призводить до пониження величини несиметрії значення напруги. Результатом подібного процесу є виникнення система несиметрії значення напруги на кожному з виводів електричних пристроїв.

Величина відхилення значення напруги електричних установок, що розміщені на перевантаженій фазі значно перевищують величину допустимих значень параметрів аналізу. При цьому відхилення величини напруги може не відбуватись і бути в межах норми.

В електроустановках при цьому спостерігається погіршення параметрів напруги та умов та режимів їх роботи. Необхідно зазначити, що в результаті подібних процесів спостерігається значне пониження показників надійності загальної електричної мережі.

Наявність в мережі струмів зі зворотною чи з нульовою послідовністю спричиняє зростання загальних величин струму на певних фазах електромережі. Подібні процеси стимулюють зростання втрат за активною потужністю. При аналізі подібних режимів з точки зору нагрівання дані процеси є недопустимими.

Через заземлюючі пристрої майже постійно протікають струми, що мають нульову провідність. За такої умови виникає висушування заземлювачів та збільшення їх опорів.

Також подібні впливи мають негативні тенденції і на релейний захист електрообладнання. На нього спостерігається значний вплив установок, що працюють на низьких частотах.

Несиметрія напруги також негативно впливає і на вентильного типу випрямлячі, що є багатофазними. При цьому зростає пульсація значень

напруги та знижується умови системи керування перетворювачів тиристорного типу.

За наявності значної несиметрії напруги викликає значне завантаження компенсаційних установок для реактивної потужності. Результатом подібної роботи є певна нерівномірність завантаження фаз потужністю, що є реактивною. В результаті отримуємо повну неможливість роботи установок компенсації реактивної потужності. Але при роботі в такому режимі установки компенсації реактивної потужності сприяють значному підвищенню вже існуючої величини несиметрії оскільки відпуск реактивного значення потужності в мережу відбувається в фазу з меншим значенням несиметрії ніж в інших фазах. Розподіл реактивної потужності по всім трьом фазам буде пропорційним величині квадрату значення напруги на конденсаційній установці.

Як зазначалось вище, несиметрія величини напруги має значний вплив на різноманітні електричні пристрої, що є однофазними. Несиметрію напруги по фазам можна також спостерігати на лампах розжарювання адже вони можуть змінювати світловий потік від величини напруги. При цьому подібні процеси значно зменшують експлуатаційні терміни для ламп та іншого обладнання.

Окрім системи релейного захисту спостерігається значне ускладнення роботи різноманітних систем автоматизації та різноманітних систем сигналізації. За подібних умов спостерігається дуже велика кількість помилок спрацювань та значні помилки в роботі приладів обліку.

Несиметрія напруги може приводити до виникнення високих вібрацій електродвигунів, які є доволі небезпечними для різноманітних шварних з'єднань. За умови значень несиметрії напруги до 30 % спостерігається відсутність перенапруг в різноманітних конструкційних елементах.

У статорах генераторів проходять різноманітні струми (нульової послідовності, прямої та зворотної послідовності) за умови наявності несиметричних навантажень з великими значеннями потужності. Вподібних ситуаціях струми прямої послідовності спричиняють магнітні поля, що мають

напрям обертання такий же як і ротор. Струми зі зворотною послідовністю створюють магнітні поля, що відповідно обертаються в зворотному напрямку до ротора.

Струми прямої послідовності спричиняють ЕРС з частотою 100Гц, а зворотної утворюють ЕРС з частотою 200Гц. Виходячи з цього при різних напрямках послідовностей струмів виникають різноманітні типи гармонік. Вони в свою чергу викликають нагрівання статора та ротора, що несе додатковий характер.

Напевно найбільшого впливу несиметрія несе для електродвигунів зменшуючи при цьому значення потужності електродвигуна на 10 %, за умови несиметрії напруги величиною 5%. При цьому спостерігається значне їх нагрівання та зменшення ККД електродвигуна.

Неповно фазні особливі режими в лініях електропередачі з глухо заземленою нейтраллю на сьогодні відомі та використовуються при експлуатації систем електропостачання міст.

За умови відключення одного проводу в ЛЕП спричиняє перехід з трифазного режиму роботи на однофазний, при цьому струми в інших двох фазах зрівнюються за всіма параметрами. Виходячи з цього спостерігається певна зміна роботи електрообладнання в подібних мережах.

Висновок до розділу

Виходячи з проведеного аналізу основними розподільчими мережами м. Суми є електромережі 6-10 кВ. При цьому з аналізу було отримано, що дані електричні мережі характеризуються декількома негативними факторами. Одним з факторів є значні втрати електричної енергії різного характеру, а також режими несиметрії роботи мережі. Виходячи з цього було проведено аналіз основних втрат електричної енергії та наведено особливості роботи системи з режимами несиметрії з наведенням особливостей боротьби з ними.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ПО ЗМЕНШЕННЮ НЕСИМЕТРІЇ В СХЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ МІСТА СУМИ

2.1 Особливості визначення несиметричних режимів роботи електричної мережі

Виходячи з попереднього аналізу визначено, що основний вплив несиметрії має саме на електродвигуни. За умови значення напруги зі зворотною послідовністю близько 10 % то електродвигун необхідно розвантажити на величину до 50% за параметром струму.

Для подальшого аналізу пропонується виконати аналіз саме роботи електродвигунів в подібній системі електропостачання зі значними несиметричними режимами роботи.

Виходячи з цього величина струму однофазного режиму роботи електродвигуна розраховується з рівняння:

$$I = \frac{\sqrt{3}U_{\partial\partial}}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.1)$$

де $U_{\partial\partial}$ – величина напруги, що виміряна на затискачах електродвигуна;

Z_1 – величина опору з значенням прямої послідовності електродвигуна;

Z_2 – величина опору з значенням зворотної послідовності електродвигуна.

Значення струму за умови роботи електродвигуна в трифазному режимі роботи можна знайти з рівняння:

$$I_3 = \frac{U_{\partial\partial}}{Z_1}, \quad (2.2)$$

Відоме на сьогодні співвідношення $\frac{I}{I_3}$ дозволяє провести визначення співвідношення струмів роботи електродвигуна в однофазному режимі та в трифазному режимі.

$$\frac{I}{I_3} = \frac{\frac{\sqrt{3U_{\text{дв}}}}{Z_1 + Z_2}}{\frac{U_{\text{дв}}}{Z_1}} = \frac{\sqrt{3Z_1}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}}, \quad (2.3)$$

Несиметрія має доволі не значний вплив на показники роботи як повітряних так і кабельних ліній. Але все ж таки сприяє певному збільшенню нагрівання всіх трансформаторів системи. В результаті спостерігається значне скорочення терміну їх роботи. необхідно зауважити, що існуючі дослідження підтверджують значне скорочення при несиметрії в межах 2-4% спостерігається скорочення терміну роботи фактично на 4%.

Оскільки на підприємствах м. Суми є доволі велика кількість електричних печей, то необхідно зауважити, що несиметрія напруги має доволі негативний вплив і на них. При цьому спостерігається зниження ККД та збільшуються втрати електроенергії. При перевищенні певних значень несиметрії напруги виникає доволі значне падіння продуктивності металоплавильних печей.

Витрати електроенергії при цьому процесі можна пояснити з формуванням певних зон реакції активного та пасивного ходів, а отже виникає певний нерівномірний розподіл по об'єму загальної ванни печі.

Величина коефіцієнту врахування зворотнього типу послідовності визначається з рівняння (2.1). Розрахунки зворотної величини послідовності U_2 користуються з рівняння:

$$U_2 = I_{2\Sigma} \cdot z_{2\Sigma}, \quad (2.4)$$

де $I_{2\Sigma}$ - величина струму, що є еквівалентним при зворотньому типу послідовності, викликане несиметрією величини напруги;

$z_{2\Sigma}$ - величина опору що визначається в межах зворотної послідовності.

Визначаємо значення струму в зворотньому типі послідовності в електричній мережі I_2 за умови початкового значення фази φ_{I_2} . При проведенні підключення трьох навантажень, що є однофазними на певну лінію АВ, СА та відповідно ВС можна розрахувати з виразу:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2 - I_{AB}I_{BC} - I_{BC}I_{CA} - I_{CA}I_{AB}} \quad (2.5)$$

$$\varphi_{I_2} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{I_{AB} + I_{BC} - 2I_{CA}}{I_{AB} - I_{BC}} - \varphi_H \quad (2.6)$$

При використанні максимальних значень величини потужностей отримаємо наступні рівняння:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 + S_{CA}^2 - S_{AB}S_{BC} - S_{BC}S_{CA} - S_{CA}S_{AB}}; \quad (2.7)$$

$$\varphi_{I_2} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{S_{AB} + S_{BC} - 2S_{CA}}{S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H. \quad (2.8)$$

За умови проведення підключення двох різних однофазних навантажень на лінію АВ а також ВС описуються відповідним рівнянням:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{3U_{ном}} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB}S_{BC}}; \quad (2.9)$$

$$\varphi_{I_2} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{S_{AB} + S_{BC}}{S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H. \quad (2.10)$$

Відносна величина для модуля $z_{2\Sigma}$ та фази опору, що є еквівалентним та має зворотню послідовність отримаємо рівняння:

$$z_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{ном} \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{ном} \sin \varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \sin \varphi_i\right)^2}}, \quad (2.11)$$

$$\arctg z_{2\Sigma} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{ном} y_i \cos \varphi_i}, \quad (2.12)$$

де $S_{номi}$ - номінальна величина повної потужності;

y_i - провідність зі зворотним типом послідовності, що є відносним відповідно до частини навантаження;

φ_i - величина фазового кута для частини навантаження.

2.2 Пропозиції по способам та рішенням зниження несиметрії для схеми електропостачання міста

На сьогодні побудова схем електропостачання міст будується таким, чином, щоб вони були симетричними, а отже не мали великих значень пульсування значень потужності. Виходячи з такого твердження величини струмів та напруги мають бути в прямій послідовності. А значить, що всі методи боротьби з несиметрією фактично направлені на забезпечення компенсації реактивної потужності, а отже на зниження нульової та прямої потужностей.

На сьогодні існує два типи проведення симетрування, що поділяють на внутрішнє та зовнішнє. Внутрішнє забезпечення симетрування проводить рівномірний розподіл по всім фазам. Даний розподіл призводить до зниження негативних впливів на загальну систему.

Подібний метод симетрування виконують для зменшення несиметрії підключення підстанцій в мережу відповідно догвинтового закону.

Серед мінусів даного методу симетрування є те, що повної симетрії досягти не вдається адже загальне навантаження залишається все одно несиметричним.

Зовнішнє симетрування забезпечується різноманітними засобами штучного характеру. Забезпечення штучного симетрування виконується з використанням різноманітних пристроїв та засобів, що приєднуються до мережі.

Основну увагу приділяють підключенню даних пристроїв до електричної мережі адже необхідно забезпечити умову створення прямої послідовності. Виходячи з цього їх підключають симетрично до трифазної мережі з узгодженням з основними джерелами живлення. Дане симетрування є найбільш поширеним способом.

Необхідно зазначити, що раціональний спосіб розподілу значень навантажень на завжди дає можливість знизити несиметрію напруги до значень, що є максимально допустимими. В подібних ситуаціях проводиться застосування спеціальних пристроїв для виконання симетрування. Спеціальні пристрої можуть бути керованими або не керованими. Керування ними здійснюється в залежності від характеристики навантаження електромережі.

Зниження величини несиметрії мережі 0,38 кВ, що має чотири проводи виконують з використанням зниження величини струму за умови використання нульової послідовності. Додатково зменшення опору спостерігається і в інших елементах електричної мережі.

Зниження величини струму в певній нульовій послідовності виконується за рахунок розподілу загального навантаження. Вирівнювання величини навантаження виконується за допомогою саме мережі в якій певна частина трансформаторів виконують роботу в паралельному режимі з низької сторони. Просте виконання нульової послідовності виконується для мереж 0,38 кВ, що влаштовані в районах з малою щільністю населення.

Також доцільно проводити операції по зниженню опору в нульовому проводі для кабельних ліній, що мають певне збільшення перерізу для конкретного нульового проводу. При цьому необхідною умовою є обов'язкове обґрунтування основних показників за економічними та технологічними розрахунками.

Доволі велике значення на виникнення несиметрії має схема з'єднання обмоток конкретного трансформатора в розподільній мережі 6-10/0,4 кВ. Необхідною умовою є врахування кількості трансформаторів в електричній мережі. За умови великої їх кількості потрібно виконувати з'єднання їх зіркою з нулевим проводом. Трансформатори з даним типом з'єднання є дешевшими та мають доволі великі значення опору при роботі в нульовій провідності.

Для проведення операцій по зниженню величини несиметрії, що виникає через трансформаторні підстанції необхідно використовувати наступні схеми з'єднання:

- з'єднання трикутник з нулем (D/Y_0);
- з'єднання зігзаг – зірка (Y/Z).

Необхідно зазначити, що найбільш ефективнішою схемою з'єднання для зниження несиметрії напруги є схема зірка-зігзаг. Але основною проблемою є те, що дагний тип трансформаторів є доволі дорогі порвняно з іншими трансформаторами, а також більш трудомісткими при їх виготовленні.

Необхідною умов для виконання симетрування навантаження однофазних мереж використовується схема, що складається з ємності та індуктивності. Для виконання операцій зі зменшення несиметрії проводять паралельне ввімкнення навантаження та ємності на лінійну напругу. При цьому на інші дві лінії проводять включення індуктивності та додаткової ємності.

При виконанні симетрування для двофазних та трифазних навантажень, що є несиметричними необхідно використовувати схеми, що мають неоднакове значення потужності для батарей компенсаторів. При цьому важливою умовою є підключення їх схемою трикутник.

Необхідно враховувати, що існують ситуації при яких буває доволі доцільно використовувати різноманітні пристрої виконання симетрування, що в своїй будові мають трансформатори чи вбудовані автотрансформатори.

Найбільш простим методом на сьогодні є підключення до фаз певних опорів, що є додатковими в системі. При цьому вдається виконати певного роду симетрування. Але основним недоліком даного методу є те, що він є доволі неекономічним через те, що веде до виникнення втрат електроенергії. Втрати електроенергії виникають в встановлених опорах. Іншою проблемою, є те, що при виникненні несиметрії в мережі потрібно мати доволі велику кількість опорів для виконання симетрування.

Подібний спосіб доволі часто використовують для вирішення питання захисту різноманітних турбогенераторів. При цьому його використовують за умови обриву певної фази на пристроях.

Існують також різноманітні багатозазні схеми для здійснення випрамлення значення струму. Подібною схемою могут бути схема Ларіонова (рис. 2.1).

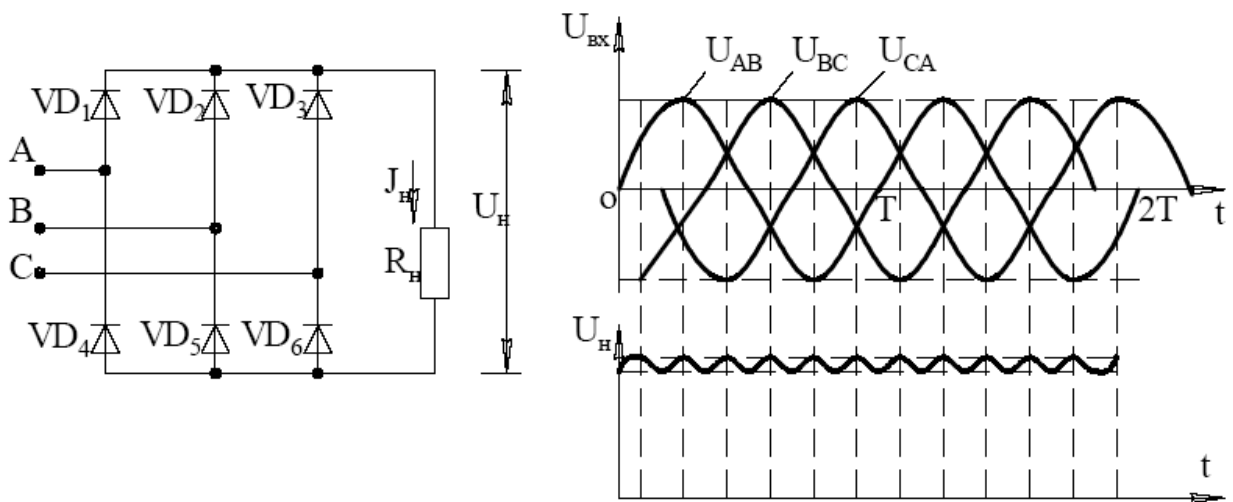


Рисунок 2.1 – Використання схеми Ларіонова для випрамлення струму

Необхідно зауважити, що дану схему можна використовувати за умови нормальної роботи однофазної системи від джерела живлення, що є постійним. При цьому даний спосіб має і відповідно певні недоліки. Основним з недоліків є проникнення в електричну мережу вищих гармонік, що викликані

загальною схемою. При цьому дане явище спричиняє значне спотворення форми та параметрів всіх кривих струма, а також кривих напруги. В результаті подібного спотворення виникає зростання втрат електроенергії, що виникають в електроустановці.

На підприємствах м. Суми доволі часто використовують агрегати типу «трифазний електродвигун – однофазний генератор», який має певні недоліки в роботі. Даний спосіб пов'язують з виникненням значних втрат параметру потужності, а також з втратами електроенергії в мережі. Іноді дані втрати досягають значення до 25 %.

Доволі частий спосіб проведення симетрування є використання різноманітних фазових зрівнювачів. Виходячи з використання даного способу спостерігається компенсація струмів зі зворотною послідовністю від несиметричного навантаження виконується з використанням різноманітних синхронних електромашин. Синхронні електромашини створюють систему ЕРС, що має зворотний тип послідовності, яка і компенсує в кінцевому випадку величини несиметрії струмів. Електромагнітні вирівнювачі фазового типу не мають доволі широкого застосування в основному через значний ваговий показник, що знаходиться в межах від 12 кг/кВА до 14 кг/кВА. При цьому окрім значних показників ваги є доволі великі габаритні розміри. Але найбільш впливовими факторами є велика складність їх конструкції та малі показники надійності при роботі.

При таких недоліках дані установки продовжують застосовують для вирішення питань компенсування параметрів, симетрування а також боротьби з коливанням величини напруги. Подібні установки пропонується застосовувати на підприємствах де використовують сталеплавильні печі, наприклад на території підприємства ПАТ «Центроліт» м. Суми.

Необхідно зазначити, що трифазні асинхронні електричні двигуни мають також можливість виконувати певне симетрування електричної мережі. Цей ефект досягається за умови коли трифазний АД підключено до системи, яка має певний режим несиметрії. При цьому такий двигун при роботі

намагається відновити симетрію в електричній мережі за рахунок процесів, що протікають всередині електродвигуна.

Описати дані процеси, що виникають в електродвигуні з симетруванням мережі:

$$\varepsilon_u = \frac{U''}{U'} = \frac{Z \cdot Z_D'' + Z_D' \cdot Z_D''}{Z \cdot Z_D' + Z_D' \cdot Z_D''} \cdot \frac{U_H''}{U_H'}, \quad (2.13)$$

де Z – загальний опір для лінії живлення, що виникає між джерелом та місцем де приєднано несиметричний тип навантаження;

Z_D' - опір електродвигуна, що виникає в прямому типі послідовності;

Z_D'' - опір електродвигуна, що виникає в зворотному типі послідовності;

U_H' - значення напруги, що виникає в прямому типі послідовності;

U_H'' - значення напруги, що виникає на зворотному типі послідовності.

З даного рівняння можна зробити висновок, що за умови $Z_D'' \ll Z_D'$ спостерігається виконання процесу зниження величини несиметрії. Виходячи з цього навантаженням змінюються фактично струми зі зворотним типом послідовності. При цьому вони мають фактично протилежні знаки величин і описується рівнянням:

$$\frac{I_H''}{-I_D'} = \frac{Z_D''}{Z} + 1, \quad (2.14)$$

де I_H'' - величина струму, що має зворотний тип послідовності викликаний навантаженням;

I'_D - величина струму, що має зворотний тип послідовності викликаний асинхронним двигуном.

При роботі електродвигуна сума даних струмів, що мають зворотний тип послідовності призводять до зменшення кінцевого значення струму.

Необхідно зазначити, що на сьогодні вже досліджено застосування асинхронних електродвигунів для виконання симетрування електричної мережі. При цьому найбільшого ефекту використання електродвигунів для симетрування досягається з використанням двигунів, що мають мінімальне значення опору зі зворотним типом послідовності.

З вищенаведених рівнянь можна зробити висновок, що за умови $Z''_D \rightarrow 0$ спостерігається зміна параметрів несиметрії, що змінюється в напрямку 0.

В даного методу є один доволі великий недолік, який полягає в тому, що для виконання симетрування мережі електродвигуни повинні працювати зі значною величиною недовантаження. Якщо електродвигун АД буде працювати в звичайному режимі то виникатиме значний перегрів з подальшим виходом його з ладу.

Доволі часто явище, це використання додаткових ЕРС, що утворюють певну систему для виконання симетрування мережі. Виходячи з цього, в систему з несиметрією вводять додатково ЕРС систему. Дану систему можна отримати через пофазну різницю, що характеризується певний коефіцієнтом, що описує величину трансформації. Також даного ефекту можна досягти через спад величини напруги від значення струму в пофазних та різних додаткових типах опорів. Даний метод є найбільш поширеним при виконанні операцій з компенсації повздовжнього типу несиметрії.

Іншим методом проведення симетрування є застосування двофазного типу трансформаторів. Даний тип симетрування набрав доволі великого розповсюдження при виконанні симетрування значень струмів ввід генератора, за умови його роботи в мережі з високою напругою. Подібне рішення використовується в зв'язку з певною неповнотою групи

трансформаторів та при виконанні передачі електроенергії на два проводи з подальшим використанням проводу землі в якості третього.

Даний метод заключається в тому, що з боку трансформатора вмикається додатковий опір до проводу на який виконано підключення обмоток двох фаз відповідного трансформатора. Додатковий опір можна замінити на однофазний трансформатор. При цьому обмотка даного трансформатора є закороченою, через що виникає додатковий опір.

Використання для симетрування трансформаторів трифазно-двофазного типу. Даний метод дозволяє виконувати симетрування лише за умови наявності навантажень, що є рівними по значенню та фазі.

Ще одним з розповсюджених методів є використання симетрувальних установок. При цьому вони підключаються до системи та створюють певну потужність, що є пульсуючою. Дана пульсуюча потужність також повинна бути рівна по величині, що зумовлені певними несиметричними величинами навантаження.

Симетрувальні установки на сьогодні поділяються на два типи за зв'язками: електричні та електромагнітні. Також відповідно до цього вони є регульованими або нерегульованими.

Всі ці методи є доволі дієвими та використовуються в електричних мережах, але необхідно зазначити, що додатково можуть бути використані різноманітні методи та обладнання з електричної мережі. Таким обладнанням можуть бути різноманітні конденсатори, фільтри та ін.

Висновок до розділу

Виходячи з основних методів та засобів виконання симетрування електричної мережі можна зазначити, що необхідно використовувати індивідуальний підхід для кожної окремої мережі. При цьому необхідною умовою для реалізації всіх заходів є виконання аналізу основних причин виникнення несиметрії. Наступним кроком є забезпечення основних особливостей цього обладнання з вирішенням питань симетрування.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Робота з програмою Multisim

Робота з електронною системою моделювання NI Multisim включає три основних етапи: створення схеми; вибір, підключення вимірювальних приладів; [20] активацію схеми – аналіз процесів, наявних у досліджуваному пристрої. Завдяки *Multisim* опис схем є простим та інтуїтивно зрозумілим. [16, 22]

Подання у вигляді електронної таблиці дозволяє змінювати характеристики будь-якої кількості елементів. Безрежимне редагування – найбільш ефективний спосіб розміщення і з'єднання компонентів. Крім традиційного SPICE-аналізу, Multisim дозволяє користувачам підключати до себе віртуальні прилади. Концепція віртуальних інструментів – це простий і оперативний спосіб отримати результат за допомогою імітації реальних подій. Наявність “інтерактивних елементів” (interactive parts) забезпечує оперативне внесення змін у роботу схеми під час емуляції. При необхідності проведення більш складного аналізу можна вибрати одну з 15 наявних функцій. Деякі приклади включають використання змінного струму, аналізи Фур'є, Монте-Карло. У Multisim входить Grapher – потужний засіб перегляду та аналізу даних емуляції. [15]

Основою будь-якої схеми є набір компонентів. Multisim оперує з двома категоріями компонентів: реальними (real) і віртуальними (virtual). У реальних компонентів, на відміну від віртуальних, є визначене, незмінне позначення та своя відповідність на платі. Параметри віртуальних елементів користувач може змінювати довільно. Існує ще одна класифікація компонентів: аналогові, цифрові, змішані, анімовані, інтерактивні, цифрові з мультівібратором, електромеханічні та радіочастотні. Окремі елементи (наприклад, змінний резистор, перемикач, тощо) можуть реагувати на дії

користувача. Зміна параметрів елементів відразу впливає на результати емуляції. [10]

Вибір необхідного елемента здійснюється через провідник компонентів (Component Browser), що активізується з панелі компонентів і забезпечує можливість вибору, пошуку, формування бази даних, створення групи компонентів. Тут відображається опис елемента, моделі та виробника. [14, 17, 18]

У Multisim існує багато функцій і засобів емуляції, які в інших, подібних пакетах проектування електроніки недоступні. Емуляція приладу дозволяє зменшити кількість циклів розробки й помилок при створенні прототипу. Для ефективного моделювання цифрових схем у Multisim убудовано емулятор XSPICE, пакет MultiMCU, що підтримує роботу з мікроконтролерами та Model Makers (конструктор моделей), який автоматично генерує модель на основі даних databook і економить час користувача. [11]

Після вибору компонентів користувач здійснює їх з'єднання згідно зі схемою, а для аналізу та проведення вимірювань використовує набір приладів. [19]

Віртуальні прилади – це модельні компоненти Multisim, які за функціями та принципом дії відповідають реальним приладам. Вони достатньо просто взаємодіють зі схемою та майже зовсім не відрізняються від традиційного електронного обладнання. У Multisim передбачено використання таких приладів: мультиметр, генератор сигналів, декілька видів осцилографів, плотер Боде, спектраналізатор. Окрему групу складають віртуальні прилади NI LabVIEW: мікрофон, гучномовець, генератор сигналів, аналізатор сигналів та інші. Усі прилади на схемі відтворюються символами (схематичними позначеннями), а в режимі візуалізації мають вигляд панелі приладу. Плотер (Grapher) – основний інструмент перегляду результатів емуляції. Результати відображаються на графіку та в таблиці. Різні налаштування плотера дозволяють змінювати

масштаби, діапазони, заголовки, стилі та багато інших параметрів. Результати можна експортувати в *NI LabVIEW*, *Excel* або *MathCAD*. [12, 15]

В *Multisim* є бази даних трьох рівнів: [15]

- З Головної бази даних (*Master Database*) можна тільки зчитувати інформацію, в ній знаходяться всі компоненти;

- Користувальницька База даних (*User Database*) відповідає поточному користувачеві комп'ютера. Вона призначена для зберігання компонентів, які небажано надавати в загальний доступ;

- Корпоративна база даних (*Corporate Database*) призначена для тих компонентів, які повинні бути доступні іншим користувачам по мережі.

Засоби управління базами даних дозволяють переміщати компоненти, об'єднувати дві бази в одну і редагувати їх. Всі бази даних розділяються на групи, а вони, в свою чергу, на сімейства. Коли користувач вибирає компонент і поміщає його в схему, створюється нова копія, Всі зміни з нею ніяк не зачіпають інформацію, що зберігається в базі даних. [15]

База даних *Master Database* розділена на групи: [23]

- 1) *Sources*. Містить всі джерела напруги і струму, заземлення. Наприклад, джерела живлення (джерела постійного, змінного напруги, заземлення, бездротові сполуки *VCC*, *VDD*, *VSS*, *VEE*), джерела напруги сигналів (джерела прямокутних імпульсів, джерело сигналу через певні проміжки часу), струмовий сигнал джерел (постійні, змінні джерела струму, джерела прямокутних імпульсів).

- 2) *Basic*. Містить основні елементи схемотехніки: резистори, індуктивні елементи, ємнісні елементи, ключі, трансформатори, реле, коннектори і т. д.

- 3) *Diodes*. Містить різні види діодів: фотодіоди, діоди Шоттки, світлодіоди і т. д.

4) *Transistors*. Містить різні види транзисторів: рnp-,NPN-транзистори, біполярні транзистори, МОП-транзистори, КМОП-транзистори і т.д.

5) *Analog*. Містить всі види підсилювачів: операційні, диференціальні, ті що інвертують і т.д.

6) *TTL*. Містить елементи транзисторно-транзисторної логіки

7) *CMOS*. Містить елементи КМОП-логіки

8) *MCU Module* - керуючий модуль багатопунктового зв'язку (від англ. *multipoint control unit*)

9) *Advanced_Peripherals*. Містить зовнішні пристрої, що підключаються (дисплеї, термінали, клавішні поля).

10) *Misc Digital*. Містить різні цифрові пристрої.

11) *Mixed*. Містить комбіновані компоненти

12) *Indicators*. Містить вимірювальні прилади (вольтметри, амперметри), лампи і т. д.

Віртуальні прилади. Всі прилади розташовані на панелі інструментів. Розглянемо основні. [18]

Мультиметр. Мультиметр призначений для вимірювання змінного або постійного струму або напруги, опору або загасання між двома вузлами схеми. Діапазон вимірювань мультиметра підбирається автоматично. Його внутрішній опір і струм близькі до ідеальних значень, але їх можна змінити. [12, 15, 30]

Генератор сигналів. Генератор сигналів (*function generator*) - це джерело напруги, яке може генерувати синусоїдальні, пилоподібні і прямокутні імпульси. Можна змінити форму сигналу, його частоту, амплітуду, коефіцієнт заповнення і постійний зсув. Діапазон генератора достатній, щоб відтворити сигнали з частотами від декількох герц до аудіо і радіочастотних. [16, 17]

Осцилограф. В *Multisim* є кілька модифікацій осцилографів, якими можна керувати як справжніми. Вони дозволяють встановлювати

параметри тимчасової розгортки і напруги, вибрати тип і рівень запуску вимірювань. Дані осцилографів можна подивитися після емуляції за допомогою самописця (*Grapher*) з меню Вид \ Плотер (*View / Grapher*). [28]

В *Multisim* є наступні осцилографи:

- 2-х канальний;
- 4-х канальний;
- Осцилограф змішаних сигналів *Agilent 54622D*;
- 4-х канальний цифровий осцилограф з записом *Tektronix TDS 2024*.

Будівник частотних характеристик (Бодє Плотер). Відображає відносний фазовий або амплітудний відгук вхідного і вихідного сигналів. Це особливо зручно при аналізі властивостей смугових фільтрів. [17]

Спектральний аналізатор. Спектральний аналізатор (*spectrum analyzer*) служить для вимірювання амплітуди гармоніки з заданою частотою. Також він може виміряти потужність сигналу і частотних компонентів, визначити наявність гармонік в сигналі. Результати роботи спектрального аналізатора відображаються в частотній області, а не часовій. Зазвичай сигнал - це функція часу, для її вимірювання використовується осцилограф. Іноді очікується синусоїдальний сигнал, але він може містити додаткові гармоніки, в результаті, неможливо виміряти рівень сигналу. Якщо ж сигнал вимірюється спектральним аналізатором, виходить частотний склад сигналу, тобто визначається амплітуда основної та додаткових гармонік. [20]

Ватметр. Прилад призначений для вимірювання потужності і коефіцієнта потужності. [22]

Вимірювальний пробник. Показують постійні та змінні напруги і струми на ділянці ланцюга, а також частоту сигналу. [26]

Аналіз. В *Multisim* передбачено безліч режимів аналізу даних емуляції, від простих до найскладніших, в тому числі і вкладених. [13]

Основні види аналізу:

1) *DC* - аналіз ланцюга на постійному струмі. Аналіз ланцюгів на постійному струмі здійснюється для резистивних схем. Це правило слідує безпосередньо з теорії електричних ланцюгів; при аналізі на постійному струмі конденсатори замінюють розривом, котушки індуктивності коротким замиканням, нелінійні компоненти, такі як діоди і транзистори, замінюють їх опором постійному струму в робочій точці. Аналіз ланцюга на постійному струмі виявляє вузлові потенціали досліджуваної схеми.

2) *AC* - аналіз ланцюга на змінному струмі. Аналіз ланцюгів на змінному струмі полягає в побудові частотних характеристик.

3) *Transient* - аналіз перехідних процесів. Аналіз перехідних процесів в ланцюгах дозволяє визначити форму вихідного сигналу, тобто побудувати графік сигналу як функції часу.

Щоб почати аналіз, необхідно вибрати пункт меню *Simulate \ Analyses* і вибрати режим. [29]

3.2 Розрахунок режиму мережі 0,38 кВ та 10 кВ за допомогою програмного продукту Multisim

В програмному продукті *Multisim* відповідно до поопорної схеми електропостачання вулиці міста створено модель досліджуваної системи електропостачання. Поопорна схема представлена на рисунку 3.1.

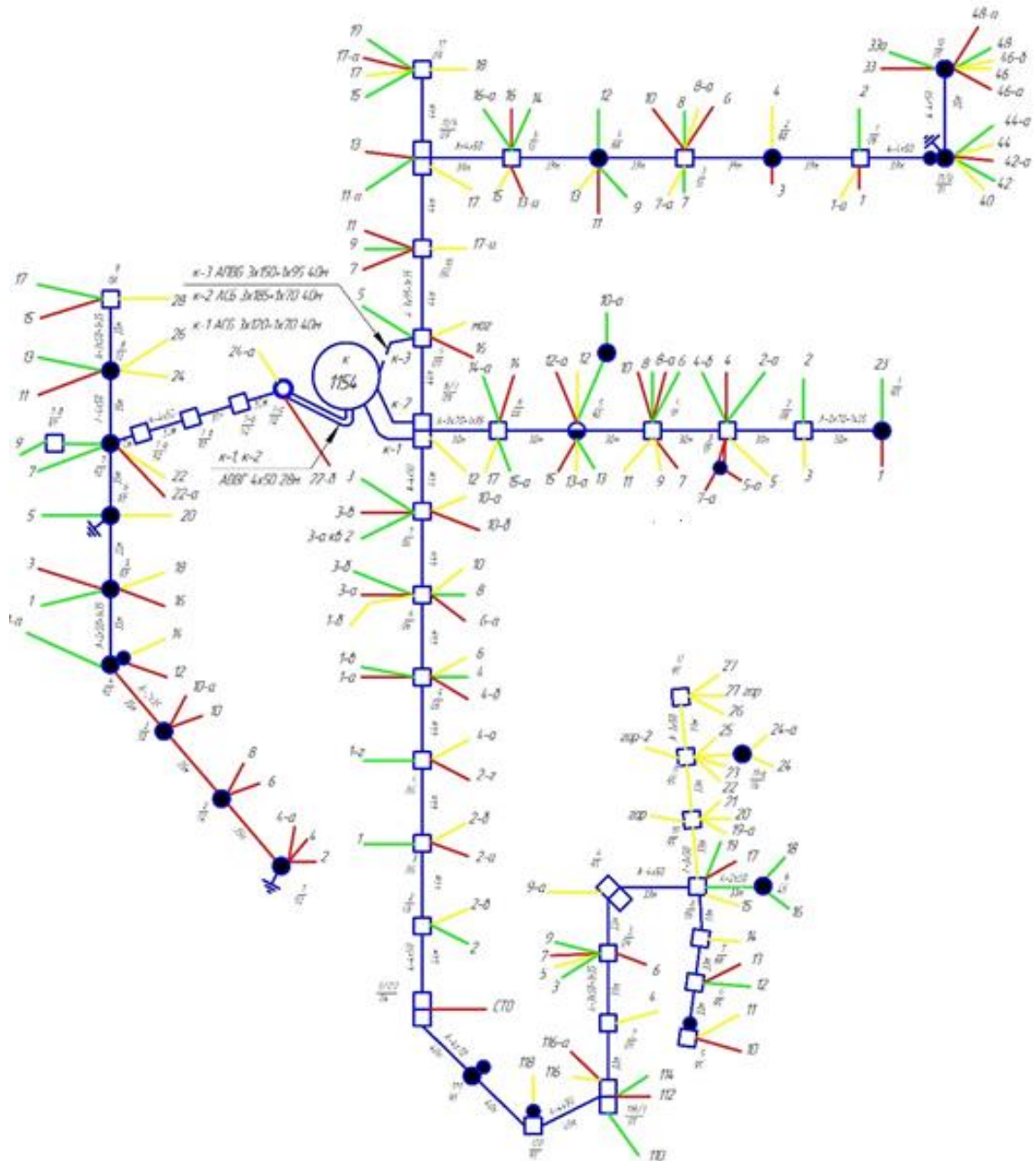


Рисунок 3.1 – Попорна схема повітряної лінії 0,38 кВ

Трансформаторна підстанція представлена у вигляді трьохфазного джерела живлення зі з'єднанням обмоток зіркою, лінійною напругою 0,38кВ та частотою 50 Гц.

Повітряні лінії представлені у вигляді резисторів з величиною опорів, які відповідають довжині та перерізу даного проводу. Резистори, які імітують ділянки повітряної лінії названі за номерами опор між якими ці ділянки знаходяться. [9, 5, 4]

Електроприймачі представлені у вигляді резисторів величини опору яких відповідає опору споживача. Резистори, якими представлені споживачі електроенергії названі номерами будинків, де вони знаходяться та номеру будинку якому відповідають. [13]

Виконаємо моделювання схеми в програмному продукті *Multisim* (рисунок 3.2).

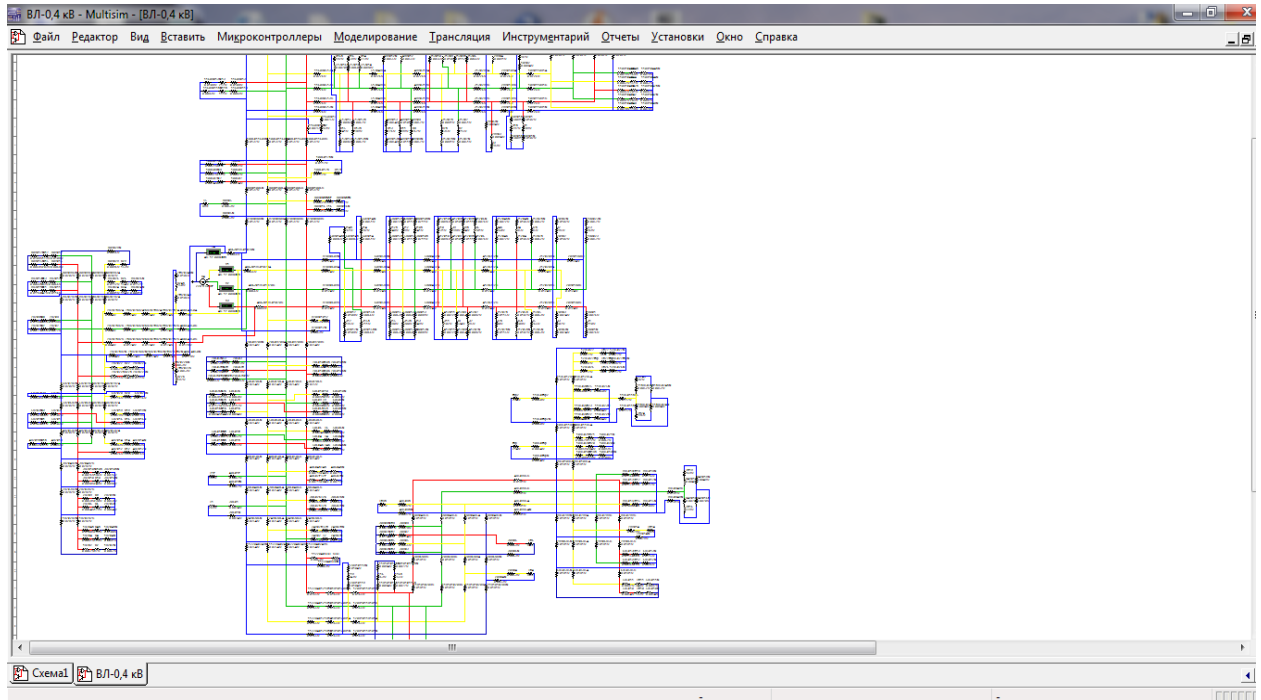


Рисунок 3.2 – Моделювання режиму роботи мережі 0,38/0,22 кВ засобами Multisim

Амперметри встановлені на виході з підстанції у трьох фазних провідниках та нульовому проводі. [12]

Як видно з результату моделювання: струм фази А $I_A = 83,3A$; струм фази В $I_B = 59,5A$; струм фази С $I_C = 80,4A$; струм в нульовому проводі $I_N = 22,1A$.

Втрати потужності визначаємо за формулою:

$$W = I^2 \cdot R, \quad (3.1)$$

де I – сила струму на ділянці;

R – величина опору ділянки.

Аналогічно до мережі 0,38 кВ виконана модель мережі 10 кВ (рисунок 3.3).

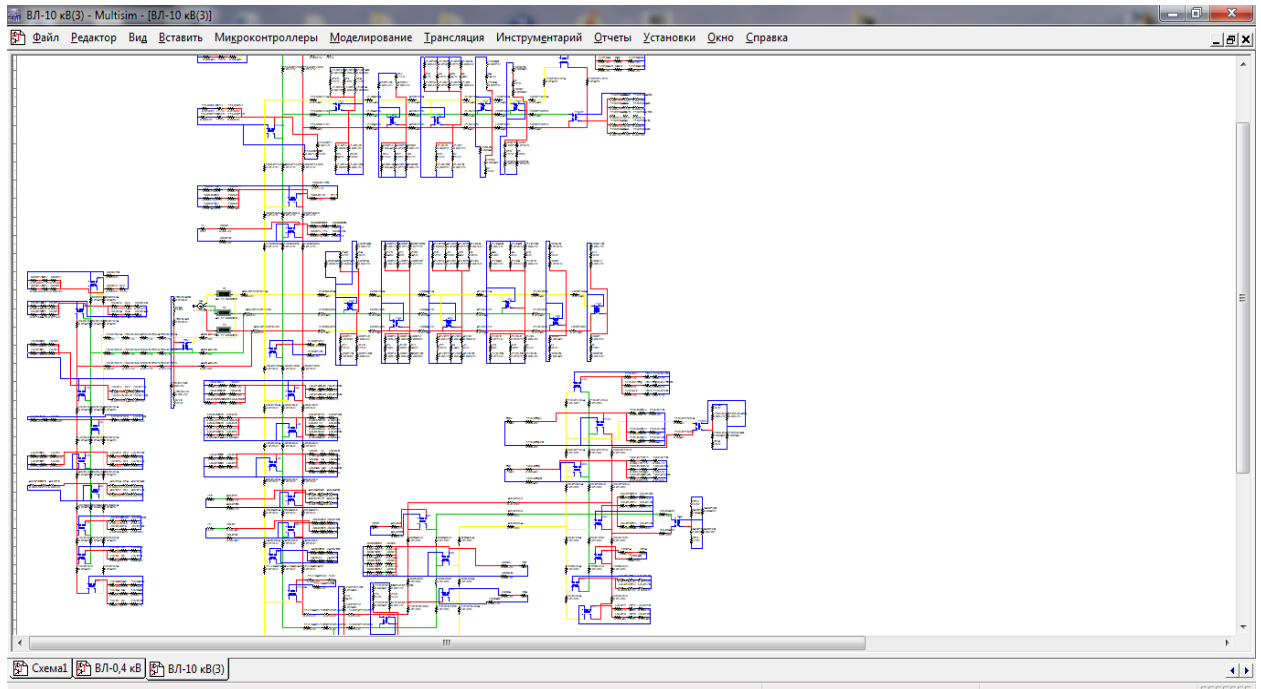


Рисунок 3.3 – Моделювання режиму роботи мережі 10 кВ засобами Multisim

Як видно з результату моделювання: струм фази А $I_A = 3,31A$; струм фази В $I_B = 3,67A$; струм фази С $I_C = 3,23A$.

Висновок до розділу

Пакет різноманітних ком'ютерних програм дозволяє доволі якісно здійснювати моделювання різноманітних систем електропостачання з мережами 0,38 кВ. Нами була розроблена схема електропостачання, яка забезпечує прохід лінії електропостачання 10 кВ. Від даної лінії здійснено живлення споживачів через трансформатори по лініях 0,38 кВ. Нами також проведено розрахунки запропонованої мережі 10 кВ.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Електричний струм – це спрямоване переміщення електричних зарядів усередині провідної речовини (усередині металів, рідких провідників і т. д.). Електричний струм, проходячи через тіло людини, обумовлює перетворення електричної енергії в інші види і спричиняє термічну, електролітичну та біологічну дії.

Термічна дія полягає в тому, що струм, проходячи через тіло людини, нагріває його, як і будь-який провідник, через який він проходить. Для використання цієї властивості електричного струму працюють електронагрівальні прилади. Таким чином, проходячи через органи людського тіла, електричний струм може викликати їхні опіки, обвуглювання тканин і всього тіла [26, 27].

Електролітична дія полягає в тому, що електричний струм має властивість розщеплювати кислотні, лужні й інші провідні рідкі розчини на складові частини.

Проходячи через тіло людини, що, як відомо, складається на 70 % із води (протоплазма клітин, кров і т.д.), він справляє подібну електролітичну дію, розщеплюючи протоплазму і кров. У результаті клітини втрачають спроможність до нормального існування, обміну речовин і т. д.

Біологічна дія електричного струму полягає в тому, що при його проходженні відбувається подразнення і збудження живих тканин організму і порушення внутрішніх біологічних процесів. У результаті можуть відбуватися мимовільні рухи кінцівок, голови, інших органів; може змінитися ритм биття серця (настає так звана фібриляція, некерована вібрація серця); порушується робота легень [28, 29].

Механічна дія електричного струму може призводити до розриву тканин внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари з тканинної рідини і крові; до вивихів,

переломів. Дія електричного струму може призвести як до травм, так і до летальних наслідків.

Вплив електричного струму на організм людини класифікують за ступенем складності:

1. Електротравми – опіки, електричні знаки (специфічне ураження тканин); металізація шкіри (частина розплавленого металу); електрофтальмія (запалення зовнішніх оболонок очей під дією ультрафіолетових променів електричної дуги); механічні ушкодження (розірвання шкіри, вивихи, переломи і т. д., викликані мимовільним скороченням м'язів).

2. Електричний удар. Розрізняють 4 ступені електричного удару:

1 ступінь – судорожне скорочення м'язів без утрати свідомості;

2 ступінь – судорожне скорочення м'язів з утратою свідомості, але зі збереженням дихання і роботи серця;

3 ступінь – втрата свідомості; порушення дихання або роботи серця;

4 ступінь – клінічна смерть.

Варто пам'ятати, що однією з особливостей небезпеки електричного струму є те, що частини устаткування, які знаходяться під напругою, найчастіше нерухомі, не мають високої температури, видимого випромінювання і т. д. Тому аналізатори людини не фіксують небезпеку, що насправді існує [30].

Наслідок враження людини електричним струмом залежить від багатьох факторів: опору тіла, тривалості протікання струму, шляху струму, роду і частоти струму, напруги.

Висновок до розділу

Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Дотримання наведених заходів дають доволі чіткі нормативи для зменшення травмонезбезпечних ситуацій та надання допомоги при отриманні ураженням різних небезпечних елементів електромереж.

5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Економічний результат капітальних вкладень в енергосистему складається з доходу, отриманого від транспорту електроенергії (доля загальних надходжень від реалізації, що припадає на електричні мережі), а також від зниження затрат, зумовленого скороченням витрат, підвищенням надійності електропостачання споживачів, зменшенням експлуатаційних витрат.

У найбільш загальному вигляді критерієм економічної ефективності являється додатне значення ефекту:

$$E = P - Z > 0, \quad (5.1)$$

де E – економічний ефект (прибуток);

P – результати (дохід);

Z – одноразові та щорічні затрати.

Визначимо ефективність капіталовкладень в реконструкцію мереж 0,4 кВ і 10 кВ. Для цього необхідно розрахувати капітальні вкладення в проект та поточні витрати на передавання електричної енергії, а також такі показники проекту як чистий інтегральний прибуток, рентабельність та строк окупності інвестицій.

5.1 Розрахунок капітальних вкладень мережі 0,4 кВ

Суму капітальних вкладень K_I на спорудження електричних мереж 0,4 кВ знаходимо за формулою:

$$K_I = K_L + K_{пст} + K_K + K_A, \text{ грн.}, \quad (5.2)$$

де K_L – сумарні капітальні вкладення в ПЛ 0,4 кВ, грн.;

$K_{\text{пст}}$ – вартість ТП 10/0,4

$K_{\text{к}}$ – вартість комірки 10 кВ, грн.;

$K_{\text{А}}$ – вартість АСКОЕ та системи АСКОЕ, грн.;

Визначаємо вартість всіх ПЛ. Дані розрахунків зводимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Дані по розподільчих мережах

Вид обладнання чи робіт	Довжина, км (кількість, шт.)	Ціна 1 км (1 шт.), грн.	Сумарна вартість, грн.
Провід АС 35	0,23	5120,00	1177,60
Провід АС 50	5,088	6867,5	34941,84
Провід АС 70	1,6	6867,5	10988,00
Провід АС 95	0,704	6867,5	4834,72
Опора з/б 0,4 кВ	52	1750,00	91000,00
Монтажні роботи			26500,00
Сумарні капіталовкладення			169442,16

Визначаємо вартість ТП-10/0,4 кВ. Дані про кількість силових трансформаторів наведено в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Дані по підстанції 10/0,4 кВ

Марка трансформатора	Кількість трансформаторів, шт.	Ціна трансформатора, грн.	Сумарна вартість, грн.
ТМН 10/0,4	2	39500,00	79000,00
Сумарні капіталовкладення			79000,00

Виконаємо порівняння основних техніко-економічних показників.

Таблиця 5.3 – Порівняння основних техніко-економічних показників

Найменування показників	Мережа 0,38 кВ	Мережа 10 кВ
1	2	3
1. Сумарні капітальні затрати, грн.	480042,16	526788,00
2. Собівартість електроенергії, грн./кВт год.	0,656	0,64
3. Поточні витрати, грн.	41854,52	25248,89
4. Дохід від транспорту електроенергії грн.	1293120,00	1307520,00
5. Балансовий прибуток, грн.	1251265,48	1282271,
6. Поточний річний чистий прибуток, грн.	875885,84	897560,00
7. Чистий інтегральний прибуток, грн.	8518266,30	8575537,67
8. Рентабельність інвестицій, %	24	18

1	2	3
9. Строк окупності капітальних вкладень, роки	4,17	5,7

Висновок до розділу

Розраховані суми капітальних вкладень необхідних для будівництва мережі 0,38 кВ та мережі 10 кВ. Виконані економічні розрахунки підтверджують ефективність запропонованих рішень.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Виходячи з проведеного аналізу основними розподільчими мережами м. Суми є електромережі 6-10 кВ. При цьому з аналізу було отримано, що дані електричні мережі характеризуються декількома негативними факторами. Одним з факторів є значні втрати електричної енергії різного характеру, а також режими несиметрії роботи мережі. Виходячи з цього було проведено аналіз основних втрат електричної енергії та наведено особливості роботи системи з режимами несиметрії з наведенням особливостей боротьби з ними.

2. Виходячи з основних методів та засобів виконання симетрування електричної мережі можна зазначити, що необхідно використовувати індивідуальний підхід для кожної окремої мережі. При цьому необхідною умовою для реалізації всіх заходів є виконання аналізу основних причин виникнення несиметрії. Наступним кроком є забезпечення основних особливостей цього обладнання з вирішенням питань симетрування.

3. Пакет різноманітних ком'ютерних програм дозволяє доволі якісно здійснювати моделювання різноманітних систем електропостачання з мережами 0,38 кВ. Нами була розроблена схема електропостачання, яка забезпечує прохід лінії електропостачання 10 кВ. Від даної лінії здійснено живлення споживачів через трансформатори по лініях 0,38 кВ. Нами також проведено розрахунки запропонованої мережі 10 кВ.

4. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Дотримання наведених заходів дають доволі чіткі нормативи для зменшення травмонебезпечних ситуацій та надання допомоги при отриманні ураженням різних небезпечних елементів електромереж.

5. Розраховані суми капітальних вкладень необхідних для будівництва мережі 0,38 кВ та мережі 10 кВ. Виконані економічні розрахунки підтверджують ефективність запропонованих рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Леонтьєв, В.О. Симетрування неповнофазних режимів в розподільних елек-тричних мережах: монографія / В.О. Леонтьєв. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 164 с.
2. Бурбело Л.М. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетру-вальних установок / Л.М. Бурбело., М.В. Кузьменко., О.О. Бірюков., О.М. Кінзерська // Вісн. ВПІ. – 2008. – № 5. – С. 35–38.
3. Кузнецов В.Г. Електромагнітна сумісність. Доза несиметрії напруги. – Технічна електродинаміка, 2005, №3. – с. 49-53.
4. Лютий О.П. Комплексний аналіз несиметрії і несинусо-їдальності в системах електропостачання з різкозмінним наван-таженням / О.П. Лютий. – Технічна електродинаміка, 2002, ч. 2. – С. 104–107.
5. Лютий О.П. Оцінка електромагнітної сумісності привипадковій несиметрії напруг в електричних мережах / О.П. Лютий. – Техніч-на електродинаміка. – 2001, №6. – С. 50–55.
6. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 р. № 258
7. НПАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 21.06.2001 р., № 272.
8. НПАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок спожива-чів, затверджені наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.98 р., № 4.
9. НАПБ Б.03.002-2007. «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою»
10. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», від 14.07.2011 р.

11. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії Тесик Ю.Ф., Жаркін А.Ф., Новський Лазуренко О.П., Ходаківський А.М., Васильченко 516 с.
12. Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення / Монографія / Є.І. Сокол, Д.А., Гапон, О.Г., Гриб, А.О. та і загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. -330 с.
13. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань.– Тернопіль: Підручники і посібники, 2001.– 976 с.
14. Von Meier, Alexandra (2006). Electric power systems: a conceptual introduction. John Wiley & Sons. с. 1. ISBN 9780470036402.
15. Voltage Tolerance Boundary (PDF). pge.com. Pacific Gas and Electric Company. Архів оригіналу (PDF) за 1 квітня 2018.
16. Shertukde, Hemchandra Madhusudan (2014). Distributed photovoltaic grid transformers. CRC Press. с. 91. ISBN 978-1482247190. OCLC 897338163.
17. Harmonic filtering in a data center? [A Power Quality discussion on UPS design]. DataCenterFix.com. Архів оригіналу за 8 липня 2011.
18. Galli та ін. (Oct 1996). Exploring the power of wavelet analysis. IEEE Computer Applications in Power. IEEE. 9 (4): 37-41. doi:10.1109/67.539845.
19. Ribeiro та ін. (2001). An enhanced data compression method for applications in power quality analysis. IECON '01. Nov. 29-Dec. 2, 2001, IEEE, The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Т. 1. с. 676-681. doi:10.1109/IECON.2001.976594.
20. Ribeiro та ін. (Apr 2004). An improved method for signal processing and compression in power quality evaluation. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491). Т. 19. IEEE. с. 464-471. doi:10.1109/PES.2003.1270480. ISBN 0-7803-7989-6.
21. Kraus, Jan; Tobiska, Tomas; Bubla, Viktor (2009). Lossless encodings and compression algorithms applied on power quality datasets. CIRED 2009 - 20th

International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 8–11 June 2009. с. 1-4. ISBN 978-1-84919126-5.

22. IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. standards.ieee.org.

23. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. www.nerc.gov.ua

24. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18.

25. Автоматизований комплекс визначення показників якості електроенергії / В. О.Мандзій, С. М. Бабюк, І. М. Сисак, В. В. Липницький. // Метрологія та прилади. – 2011. – №1. – С. 34–38.

26. Ward D.J. (2001). Power quality and the security of electricity supply. Proceedings of the IEEE, 89(12), 1830-1836.

27. Liang, Xiaodong. «Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources.» IEEE Transactions on Industry Applications 53.2 (2016): 855-866.

28. Олійник Ю.С. Якість електричної енергії / Ю.С. Олійник // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2018. - Вип. 196. - С. 113-115. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2018_196_42

29. Канабас Д.С., & Тимохін О.В. (2021). Якість електроенергії в електричних мережах України та світу. Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», 24-27.

30. Євтух П.С. Сучасні методи діагностування якості електроенергії та покращення її показників / П.С. Євтух, О.О. Вакуленко, В.Р. Щербатюк // Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019 року. - Т : ТНТУ, 2019.

31. Оробчук Б.Я. Система управління регулятором якості електроенергії / Б.Я. Оробчук, А.П. Веремейчик // Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 28-29 листопада 2018 року.

32. Решетник В. Схемо-технічні рішення покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств / Віктор Решетник, Олександр Вакуленко, Валентин Коркулов // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» 22-24 травня 2018. – Т. : ТНТУ, 2018. – С. 272-273.

33. Monteiro Pereira R.M. FACTS performance in the dynamic voltage stability of an electric power system / R.M. Monteiro Pereira, Adelino J.C. Pereira, S.M. Machado Ferreira, F.P. Maciel Barbosa // 52nd International Universities Power Engineering Conference. – 2017. – Pp. 1-5.

34. Бунько В.Я. Аналіз електромагнітної сумісності системи «мережаактивний фільтр гармонік», яка впливає на якість електричної енергії [Електронний ресурс] / В.Я. Бунько // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2015. - Вип. 209(1). - С. 105-112. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_209\(1\)_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_209(1)_17)