

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Центр перепідготовки та післядипломної освіти
(повна назва факультету)
електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня
магістр

на тему: **Зниження впливу споживачів з нелінійним навантаженням
на розподільчу мережу 10 кВ**

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи ЕТмд-61

спеціальності 141–

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Антимис В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Буняк О.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Мовчан Л.Т.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет центр перепідготовки та післядипломної освіти
 (повна назва факультету)
 Кафедра електричної інженерії
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ЕІ
 Коваль В.П.
 (підпис) (прізвище та ініціали)
 “ 11 ” жовтня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
 (назва освітнього ступеня)
 за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (шифр і назва спеціальності)
 студенту Антимису Василю Богдановичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Зниження впливу споживачів з нелінійним навантаженням на розподільчу мережу 10 кВ

Керівник роботи Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від “10” жовтня 2024 р. № 4/7-985

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи розподільні лінії електричних мереж 10 кВ з нелінійним навантаженням; забезпечення; пристрої компенсації реактивної потужності

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Проектно-конструкторський розділ. 3. Розрахунково-дослідницький розділ. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Засоби забезпечення показників якості електричної енергії на промислових підприємства. Способи компенсації реактивної потужності (КРП) та її особливості при присутності споживачів з нелінійним навантаженням. Дослідження КРП з фільтрацією струмів вищих гармонік. Схемо-технічні рішення щодо зниження гармонійних спотворень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	15.09.24 - 01.11.24	
2	Аналітичний розділ	11.10.24 - 01.11.24	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	11.10.24 - 01.11.24	
4	Проектно-конструкторський розділ	11.10.24 - 01.11.24	
5	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	11.10.24 - 01.11.24	
6	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	01.11.24 - 15.12.24	
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	15.12.24 - 20.12.24	

Студент

(підпис)

Антимис В.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Буняк О. А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Центр перепідготовки та післядипломної освіти. Кафедра електричної інженерії, група ЕТмд-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2024.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання забезпечення пропускної здатності в системах розподільних мереж 10 кВ з нелінійним навантаженням.

Встановлено, що ефективність компенсації реактивної потужності лише за рахунок застосування багатофазних вентильних перетворювачів необхідна, що дозволяє у багатьох випадках суттєво знизити спотворення на ланках 10 кВ .

Досліджено, що пристрої поперечної компенсації знижують втрати за напругою в вузлах споживачів, завдяки зниженню навантаження реактивної потужності за навантаженням та на лініях.

Аналіз застосування схемо-технічних рішень щодо компенсації реактивної потужності в мережах зі споживачами з нелінійним навантаженням показав вагомий недолік гібридних та активних фільтрів.

Досліджено, що гібридні фільтри в співставленні з пасивними LC -фільтрами показують зниження характеристик струмів найвищих гармонік в електричній мережі, а комбінований фільтр знижує коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, реактивна потужність, поперечна компенсація, надійність, активний фільтр.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Оцінка впливу на показники якості електричної енергії споживачів промислових підприємств з нелінійних навантаженням	8
1.2 Основні шляхи та технічні засоби для забезпечення ПЯЕЕ на промислових підприємствах	11
1.3 Компенсація реактивної потужності ліній розподільних мереж середньої напруги	18
1.4 Аналіз способів КРП	24
1.5 Висновки до першого розділу	26
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	28
2.1 Особливості компенсації реактивної потужності споживачів з нелінійним навантаженням	28
2.2 Метод поперечної ємнісної компенсації реактивної потужності	32
2.3 Дослідження компенсації реактивної потужності з фільтрацією струмів вищих гармонік	36
2.4 Висновки до другого розділу.....	42
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	43
3.1 Розробка заходів щодо зменшення гармонійних спотворень на підприємстві	43
3.1.1 Проектно-конструкторські рішення	46
3.1.2 Застосування пристроїв придушення гармонік	47
3.1.3 Використання спеціальних пристроїв	49
3.4 Висновки до третього розділу	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
4.1 Заходи з охорони праці при обслуговуванні електричних установок на підстанції	58

4.2 Заходи щодо підвищення стійкості підстанції від впливу електромагнітного імпульсу	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	66

ВСТУП

Актуальність теми.

Ефективність сучасних систем електропостачання промислових підприємств із великим двигунним навантаженням визначається рівнем практичного вирішення завдання компенсації реактивної потужності в розподільчих мережах та забезпечення електромагнітної сумісності (*ЕМС*) з підтримкою показників якості електричної енергії [1, 2].

Основною причиною загострення проблеми *ЕМС* в системі електропостачання промислових підприємств є стійке зростання кількості та потужності енергоємних нелінійних, несиметричних та різко змінних споживачів електроенергії. До таких споживачів належать тиристорні перетворювачі, стабілізатори, регулятори, потужні зварювальні та інші спеціальні електротехнічні установки [1].

Як показують дослідження для забезпечення *ЕМС* в системі електропостачання, застосування пристроїв компенсації реактивної потужності та придушення вищих гармонік у розподільчих мережах необхідне та доцільне [3].

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є забезпечення пропускну здатності в системах розподільних мереж 10 кВ зі споживачами з нелінійним навантаженням за рахунок зниження втрат активної потужності.

Відповідно до вказаної мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз способів компенсації впливу споживачів з нелінійним навантаженням на розподільчу мережу 10 кВ;
- провести аналіз особливостей компенсації реактивної потужності в нелінійних колах;
- дослідити метод поперечної ємнісної компенсації для зниження втрат напруги в розподільних мережах 10 кВ;

– дослідити використання комбінованих фільтрів для зниження впливу нелінійного навантаження в розподільних мережах 10 кВ.

Об’єкт дослідження – розподільчі мережі 10 кВ з нелінійним навантаженням.

Предмет дослідження – методи та засоби зниження впливу споживачів з нелінійним навантаженням на розподільчу мережу 10 кВ.

Наукова новизна отриманих результатів.

– отримало подальший розвиток застосування методів зниження впливу споживачів із нелінійним навантаженням на розподільчу мережу 10 кВ.

Практичне значення отриманих результатів. Показано, що пристрої поперечної компенсації знижують втрати за напругою в вузлах споживачів, завдяки зниженню навантаження реактивної потужності за навантаженням та на лініях.

Застосування силових гібридних фільтрів (*СГФ*) допоможе підвищити *ЕМС* на підприємствах, а використання комбінованих фільтрів – знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги.

Апробація.

Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на VII Міжнародній науково-технічній конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“ (29-31 травня 2024 року), Тернопіль, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (20 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 68 сторінок, 3 таблиці, 31 рисунок.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Оцінка впливу на показники якості електричної енергії споживачів промислових підприємств з нелінійних навантаженням

Показники якості електричної енергії (*ПЯЕЕ*) щодо трифазних і однофазних електричних мереж регламентуються у відповідності [3] (*ГОСТ 13109 – 97*) та визначаються в місцях під'єднання *ЕП*.

На промислових підприємствах значного поширення набули навантаження, вольт-амперні характеристики яких нелінійні: пристрої дугового та контактного зварювання, тиристорні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, газорозрядні лампи та інше – споживачі, які споживають струм, що надає несинусоїдальне навантаження, внаслідок чого з'являються нелінійні спотворення напруги мережі або несинусоїдальні режими (спотворення форми напруги (струму)) [1].

У відповідності з теоретичним представленням, несинусоїдальність описують рядом складових різних частот, тобто, гармонічними складовими, де основна складова (період) гармоніки становить частоту 50 Гц , а гармоніки інших (вищих) частот спотворюють результуючу синусоїду, яка описується коефіцієнтом спотворення кривої напруги (струму) [2]:

$$K_{U(i)} = \frac{100}{U_{nom}} \sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{n(i)}^2}, \quad (1)$$

де n – номер гармонічної складової.

Гармоніки вищих частот напруги (струму) негативно діють на роботу електричних мереж та електричного обладнання автоматизованих систем, мікропроцесорних блоків релейного захисту, систем передачі даних засобами зв'язку. Також, гармоніки вищих частот (*ВГ*) призводять до зростання активних втрат на ланках 10 кВ , зниження умов компенсації реактивної складової, що, в подальшому, призводить до прискорення старіння ізоляції та надійності розподільчої мережі в цілому, скорочення терміну експлуатації електричного

обладнання, зниження енергетичних показників, виникнення недопустимих рівнів наведеної напруги в лініях передачі електричної енергії [3].

Також, вказане електричне обладнання у трифазних і однофазних ланках мережі промислових підприємств є джерелом несиметрії напруги. В окремих випадках загальне навантаження підприємства може становити до 80% несиметричного навантаження.

Несиметрія напруги визначається присутністю в трифазній ланці складової напруги нульової та напруги зворотної послідовності, які є несуттєві за величиною по відношенню за значення напруги прямої послідовності, але, сумарно, їхня дія призводить до зміни фазної (міжфазної) напруги за абсолютним значенням [2]. Описані показники зворотної та нульової послідовностей визначаються відповідними коефіцієнтами [2]:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(i)}}{U_{ном.мф}} \cdot 100 \%, K_{0U} = \frac{U_{0(i)}}{U_{ном.ф}} \cdot 100 \%, \quad (1.2)$$

де $U_{ном.мф}$ – значення міжфазної напруги;

$U_{ном.ф}$ – значення фазної напруги,

причому, значення показника *ПЯЕЕ* за нульової послідовністю обчислюється для 4-х провідної мережі [4, 5].

Аналіз нормованих *ПЯЕЕ* вказує, що не всі значення коефіцієнтів можуть бути встановлені безпосереднім вимірюванням, тому, це ускладнює здійснення контролю якості електроенергії.

Проведений аналіз впливу *ПЯЕЕ* на експлуатаційні характеристики (*ЕХ*) *ЕП* для розуміння необхідності забезпечення нормованих значень показників показав [1-5]:

1. Зміна рівня напруги живлення для двигунного навантаження призводить до зниження продуктивності механізмів та, відповідно, якості проведення технологічних процесів, внаслідок зміни споживання активної та реактивної потужності.

2. Зміна напруги призводить до зростання втрат на корону в розподільчих мережах 10кВ – $(\Delta P_{\text{кор.}} = U^2 \cdot g_0 \cdot L)$ та зарядної потужності – $(Q_{\text{зр}} = U^2 \cdot b_0 \cdot L)$.

3. Спотворення синусоїди струму (напруги) внаслідок негативного впливу гармонійних складових вищих частот призводить до зростання втрат потужності (енергії) як в *ЕП* (двигуни – додаткові втрати призводять до зниження коефіцієнта потужності), так і на ланках *СЕП* (повітряні, кабельні лінії), які оцінюються з виразу [2]:

$$\Delta A = 3 \cdot T \cdot \sum_{v=3}^m K_{\phi v}^2 \cdot I_{\text{ср.}v}^2 \cdot R_v, \quad (1.3)$$

де T – період розрахунку;

$K_{\phi v}$ – коефіцієнт форми v -ої гармоніки;

R_v – величина активного опору одиниці *СЕП* струмам *ВГ*.

4. В трансформаторах дія *ВГ* напруги викликає зростання магнітних втрат (гістерезис, вихрові струми), що призводить до прискорення старіння ізоляції.

5. Спотворення напруги (струму) призводить до зниження точності електричних пристроїв вимірювання та ускладнюється передача інформації силовими ланками (каналів); унеможливлення роботи типів навантажень які є джерелами створення сигналів з вищими гармонійними складовими.

6. Перевантаження струмами *ВГ* обмежує використання батарей конденсаторів (*КБ*) для покращання значення коефіцієнта потужності, та може призвести до виникнення резонансних процесів.

7. Присутність несиметричних струмів навантаження призводить до появи несиметричної системи напруги в електричних колах *ЕП*, що погіршує їхню роботу та мережі в цілому. Орієнтовну оцінку несиметрії з врахуванням послідовностей (пряма, зворотна, нульова) можна проводити за спрощеними формулами:

$$U_{1(1)} = \frac{1}{3} \cdot (U_{\text{BA}(1)} + U_{\text{CB}(1)} + U_{\text{AC}(1)}), \quad (1.4)$$

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (U_{\text{max}(1)} - U_{\text{min}(1)}), \quad U_{0(1)} = 0,62 \cdot (U_{\text{max} \phi(1)} - U_{\text{min} \phi(1)}),$$

де $U_{\max(1)}$, $U_{\min(1)}$, $U_{\max \phi(1)}$, $U_{\min \phi(1)}$ – період розрахунку;

8. Електромагнітна компонента несиметрії напруги призводить до зростання втрат активної складової потужності, не компенсації *БК* реактивної потужності, прискоренням процесів старіння ізоляції *ЕП*, зниженням освітлення робочих ділянок та, відповідно, зменшенням терміну служби світильників.

1.2 Основні шляхи та технічні засоби для забезпечення ПЯЕЕ на промислових підприємствах

Проблема забезпечення показників якості електричної енергії (*ПЯЕЕ*) в системах електропостачання (*СЕП*) нині певною мірою трансформується на більш конкретні питання – підвищення ефективності перетворення енергії на базі пристроїв силової перетворювальної техніки (*СПТ*) шляхом максимально можливого вдосконалення цих пристроїв [6, 7].

Водночас вагому роль несуть досягнення таких показників споживчої вартості (конкурентоспроможності), як спрощення схемних структур, уніфікація та взаємозамінність окремих елементів, вузлів та модулів, зменшення встановленої потужності обладнання, забезпечення високої надійності, живучості, ремонтпридатності, реконструкції та модернізації [6].

Всі вказані фактори, з теоретичної точки зору, не завжди є принциповими та складові комплексних показників споживчої вартості промислової продукції, у своїй сукупності вирішальним чином визначають практичну перспективу масового застосування будь-яких технічних нововведень, серед яких засоби перетворення енергії та забезпечення *ПЯЕЕ* в *СЕП* не можуть претендувати на якийсь виняток.

Вище перераховане визначає актуальність проблеми підвищення ефективності та перетворення енергії в *СЕП* за рахунок розробки та обґрунтування низки нових технічних рішень, що забезпечують більш високі

показники споживчої вартості таких пристроїв як: багатофазні вентильні перетворювачі (*БВП*); тиристорні компенсатори реактивної потужності (*ТКРП*); тиристорні регулятори потужності (*ТРП*) та фільтро-компенсуючі пристрої (*ФКП*), які суттєво впливають на систему електропостачання промислових підприємств [4].

Що стосовно засобів зниження несинусоїдальності напруги прийнятні наступні варіанти:

- застосуванням схемо технічних рішень: групування *БВП* за схемою множення фаз; встановлення окремої шини для устаткування з нелінійним навантаженням; перемикання обладнання з нелінійним навантаження на ланки з більшими струмами *КЗ*;
- застосуванням трансформаторів без насичення та *БВП* для зниження рівня генерації *ВГ*;
- використанням *ФКП*, фільтросиметруючих пристроїв (*ФСП*), резонансних фільтрів (*РФ*) [7].

Аналіз показує, що для забезпечення необхідної форми синусоїди напруги в більшості випадків слід застосовувати спеціальні заходи.

Основні напрями забезпечення показників якості електричної енергії у системах електропостачання підприємств за технічними рішеннями зведено у таблиці 1.1.

Напівпровідникові перетворювальні пристрої широко використовуються в системах електропередачі електричної енергії, промислового електроприводі, для живлення електролізних та гальванічних установок, дугових та плазмових печей та інших цілей.

Таблиця 1.1 – Основні напрямки забезпечення *ПЯЕЕ* в *СЕП*

<i>Спеціальні засоби забезпечення ПЯЕЕ в СЕП</i>	<i>Удосконалення мереж СЕП та навантажень</i>	<i>Підвищення ефективності вентильних пристроїв</i>	<i>Економічні заходи</i>
Швидкодіючі синхронні компенсатори	Схеми обмоток трансформаторів у Δ/Y_0 та Y/Z_0	Збільшення фазності перетворення	Методи аналізу економічної шкоди
Регульовані батареї конденсаторів	Розщеплення обмоток трансформаторів	Поділ за управління	Норми <i>ПЯЕЕ</i>
Силові фільтри	Тиристорні <i>РПН</i>	Штучна комутація	міри матеріального впливу
<i>ФКП</i>	—	—	Розрахунковий метод
Динамічні джерела реактивної потужності	—	—	Розрахунковий метод
<i>ФСП</i>	—	—	Розрахунковий метод
Фазо перетворювальні пристрої	—	—	Розрахунковий метод
Тиристорні компенсатори	—	—	Розрахунковий метод

Це, як правило, потужні споживачі електроенергії, і у зв'язку з підвищенням вимог до якості електроенергії, зростанням її вартості, а також вимогами економії матеріальних ресурсів багато конкретних проблеми пов'язані з перетворювальними трансформаторами та мають вирішуватись прискореними темпами:

- підвищення одиничною потужності трансформаторів з метою зниження питомої матеріаломісткості та підвищення *ККД* обладнання;
- розробка економічних схем і пристроїв, які підвищують фазність перетворення та покращують форму кривої струму, що споживається;
- розробка та використання заходів, які забезпечують підвищення коефіцієнта потужності перетворювальних пристроїв.

Значну роль підвищення енергоефективності для систем електропостачання займає силова електроніка, через те, що це методи оптимізації енергопостачання засновані на енергії управління об'єктом. Всі процеси, що ґрунтуються на перетвореннях за допомогою пристроїв з вентильною групою, були розроблені нещодавно [7].

До основних напрямів підвищення ефективності вентильних пристроїв (*ВП*) відносяться: збільшення фазності перетворення; поділ за управлінням; штучна комутація.

Загальновизнаним заходом поліпшення енергетичної сумісності *ВП* з мережею живлення є підвищення фазності перетворення електроенергії. Тому актуальним є проведення досліджень та розробок, спрямованих на створення *ВП* вентильних перетворювачів підвищеної фазності.

Відомим способом досягнення еквівалентного режиму перетворення енергії є штучний поворот на кут один щодо одного векторів напруг на входах вентильного моста, що забезпечується використанням системи керування, застосуванням фазо поворотних пристроїв, або за рахунок секціонування обмоток трансформаторів [2].

Як показав аналіз [1,2,3], доведено технічну та економічну доцільність використання в деяких потужних енергетичних та промислових вентильних електроустановках еквівалентного багатополусного ($6m$ -фазного) режиму перетворення електроенергії, який komponується з перетворювачів, які з'єднані між собою ланцюгом постійного струму послідовно. Вектори трифазних систем

випрямленої напруги окремих перетворювачів *БВП* зсунуті відносно один одного на кут $\delta = 2\pi / 6m$.

Аналіз відомих результатів та дослідження низки нових схем *БВП* дозволили дійти висновку, що деякі з найбільш суттєвих показників можуть бути отримані на підставі загальних закономірностей, до яких, в першу чергу, слід віднести зв'язок форми та гармонійного складу фазного струму в мережі живлення з відомими заздалегідь формою та гармонійним складом фазних струмів на вході *ВП* при різних кутах δ та зв'язок між знаком кута повороту δ і схемою підключення трансформаторів до мережі живлення [1].

Компенсація *ВГ* при багатофазних схемах перетворення виконується за допомогою забезпечення фазових зсувів кутів струмів, що протікають у двообмотковому трансформаторі з розщепленими вентильними обмотками, або мережевих обмотках групи трансформаторів, підключених на шини однієї системи, або того й іншого способу [3]. Для цієї мети встановлюються спеціальні трансформатори з різними схемами з'єднання обмоток (рис. 1.1) [2].

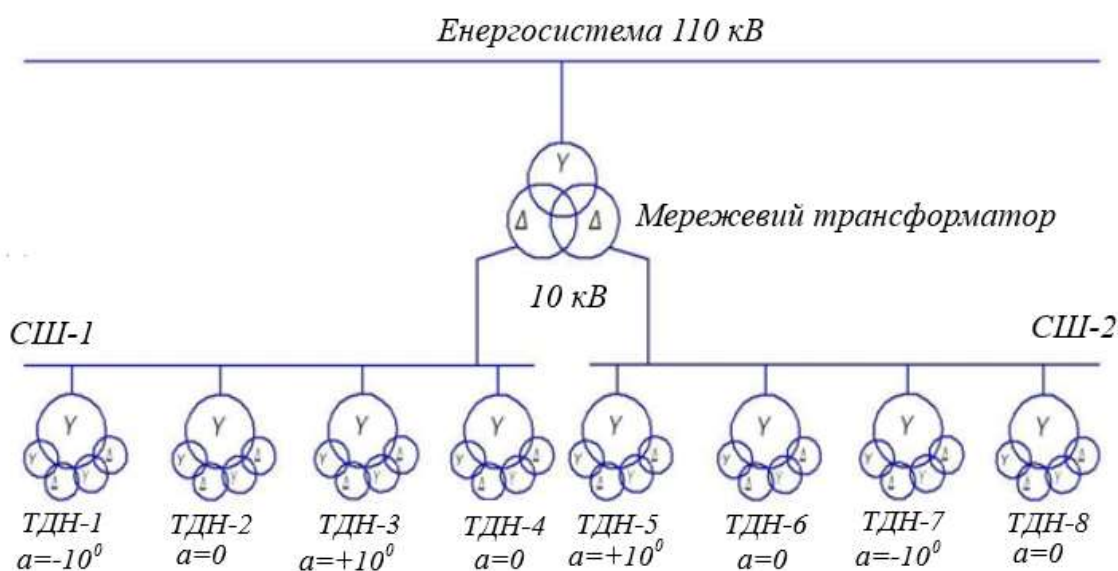


Рисунок 1.1 – 36-фазна схема компенсації *ВГ* на шинах.

Електропостачання $СШ-1$ та $СШ-2$ (рис. 1.1) відбувається безпосередньо від мереж високої напруги 110кВ через силові трансформатори. Незважаючи на це, значна частина перетворювальної потужності навантаження, що місцями досягають потужностей живильної енергосистеми, сприяють погіршенню $ПЯЕЕ$ не тільки на шинах 10кВ підприємства, а й у мережах 110кВ .

При використанні $ФКП$ як засобу зниження несинусоїдальності, ланка фільтра $ВГ$ (послідовно з'єднана індуктивність та ємність) працює на частоті одної гармоніки, де опір ділянки фільтра струмами $ВГ$ [4]:

$$X_{\phi\nu} = X_L \cdot \nu - \frac{X_C}{\nu}, \quad (1.5)$$

відносно струму цієї гармоніки буде рівний нулю при рівності індуктивного (X_L) та ємнісного (X_C) опорів (резонанс напруг при зростанні частоти) і відбувається шунтування на частоті даної гармоніки. Проте, присутність в ланці активних складових на індуктивності та ємності не дозволяє повністю «фільтрувати» $ВГ$. При цьому, недоліками $ФКП$ є висока вартість та, враховуючи їх високу чутливість, необхідність точного налаштування, що обмежує використання. Шляхи усунення несиметрії напруги залежать від причини виникнення. Первинно, перерозподіл навантаження однофазних споживачів може бути ефективним способом за умови стабільних навантажень.

В більшості випадків необхідне використання спеціальних $ФСП$, ефективність використання яких залежить від схемної реалізації.

Наприклад, ефективним способом є ввімкнення в «трикутник» $КБ$ різної потужності [2]. За методом симетричних складових змінні трифазної системи представляються у виді 3-ох симетричних систем (пряма, зворотна, нульова послідовності), що різняться порядком розміщення фаз (рис. 1.2). Це дозволяє несиметричну систему струмів в кінцевому варіанті зобразити в виді:

$$I_1 = 1/\sqrt{3} \cdot (I_{ab} + I_{bc} + I_{ca}), \quad I_2 = 1/\sqrt{3} \cdot (a^2 \cdot I_{ab} + I_{bc} + I_{ca}), \quad (1.6)$$

де a – оператор повороту.

Тобто, переведенням KB у несиметричний режим (перемикання KB на інші вітки, відключення частини KB) забезпечується симетрування в системі. Присутність KB в пристрої симетрування дозволяє використати їх і для компенсації реактивної потужності.

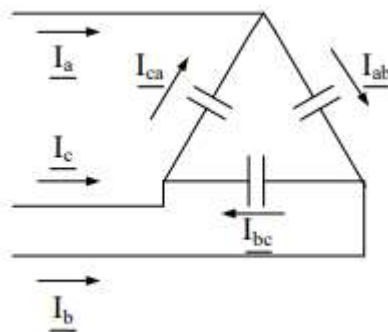


Рисунок 1.2 – Розподіл струмів KB .

Щодо коливань напруги, основними шляхами обмеження впливу є оптимізація схем електропостачання ланок 10кВ та $0,4\text{кВ}$, які дозволяють звести до мінімуму додаткові втрати:

- під'єднання $ЕП$ з швидкозмінним навантаженням до одного трансформатора;
- розміщення джерел напруги 10кВ поблизу $ЕП$ з швидкозмінним навантаженням;
- в електричних мережах, що забезпечують $ЕП$ з швидкозмінним навантаженням, забезпечувати оптимальне значення потужності $КЗ$.

При нелінійному та/або швидкозмінному навантаженні, статична нестабільність напруги пов'язана з дисбалансом реактивної потужності. Тому, застосування статичних елементів для компенсації реактивної потужності є необхідною умовою підтримки стійкості в системі. В цьому випадку забезпечується динамічна стійкість регулюванням реактивної потужності. За такими умовами можна прослідкувати забезпечення техніко-економічних показників мережі шляхом підвищення статичної стійкості [3].

Статичні компенсатори реактивної потужності (*СКРП*), що складаються з *КБ* та реактора, на даний час, є найбільш перспективними пристроями для компенсації реактивної потужності. В результаті цього можна отримати позитивні фактори: швидкодіюче регулювання, зниження до мінімуму коливань напруги, симетрія більшості навантажень, плавність регулювання компенсованої в мережі реактивної енергії.

Завдяки описаним пристроям є можливість здійснювати векторне регулювання: одночасно змінювати модуль і фазу напруги, забезпечуючи зниження активних втрат у мережах та компенсацію реактивної потужності на основній частоті.

1.3 Компенсація реактивної потужності ліній розподільних мереж середньої напруги

Як було означено, компенсація реактивної потужності (*КРП*) відноситься до одного з ключових методів забезпечення *ПЯЕЕ* при передаванні, розподіленні та споживанні електроенергії. Від професійного вирішення питання *КРП* залежить економія фінансових ресурсів. Тому, питання технічної реалізації щодо використання *КРП* необхідно аналізувати з врахуванням нових підходів в електротехнічній галузі [8].

ЕП в номінальних режимах роботи та в режимі перехідного процесу споживають активну компоненту (P) (для отримання обертового моменту двигунами, теплова та світлова енергія) – виконання роботи та реактивну компоненту (Q) (для створення обертового магнітного поля – в двигунах; магнітних полів в індуктивних елементах та трансформаторах) – переміщення між джерелом та споживачем.

На відміну від активної (корисної) потужності, реактивна потужність необхідна для забезпечення магнітної компоненти в індуктивних приймачах

(електродвигуни, трансформатори, тощо), циркулюючих весь час між джерелом струму і приймачами [8].

Введення безпосередньої оплати за реактивну компоненту струму споживання (1991 рік), особливо в пікові години навантаження, призвела до актуальності питання *КРП*. Постійне підвищення тарифів та електричну енергії змушує детально аналізувати шляхи використання *КРП* окремо для кожного випадку.

Теоретичний аналіз джерел [5, 6, 9, 10] дозволяє означити основні аспекти проблеми *КРП*:

- нераціонально здійснювати транспортування реактивної потужності *ЛЕП* високої напруги;
- використання місцевого (локального) встановлення установок *КРП* – політика енергозбереження та зниження втрат електричної енергії в мережах;
- підвищення вимог до *ПЯЕЕ* у відповідності до норматив [6] – реактивна потужність суттєво позначається при різних режимах напруги в мережах;
- потужність компенсаційних установок в розподільчих мережах є недостатньою.

Завдання *КРП* можна вирішити шляхом створення натурального режиму роботи ліній розподільної мережі.

Через упущення на стадії проектування розподільчих мереж середньої напруги 10кВ врахування *КРП*, виникла проблема зниження коефіцієнта потужності до 0,8–0,85. По при все слід наголосити, що діапазон нормованих значень показників потужності для фідерів 10кВ, що під'єднуються до мережі, становить $\cos(\varphi) = 0,93–0,94$.

Зростання усереднених втрат у розподільчих мережах, зниження пропускної спроможності всіх мереж, і, як результат – зростання витрат на передаванні електричної енергії – всі це як наслідок відсутності установок *КРП*. Використання *КРП* дозволяє покращити техніко-економічні характеристики розподільчих мереж середнього напруги (6(10) кВ) на основі [5]:

- зниження до мінімуму всіх втрат активної потужності та спаду напруги в мережі;
- підвищенням пропускної здатності трансформаторів 10кВ ;
- забезпечення можливості використання $\Phi\text{СП}$ в мережах із розбалансованим навантаженням.

Завдяки цьому установки КРП стали необхідністю як у споживачів (на шинах $0,4\text{кВ}$ підстанцій), так і в розподільчих мережах на стороні 10кВ (розподільчі пристрої 10кВ знижувальної підстанції).

Установки для КРП з метою підвищення ПЯЕЕ не рідко використовують для:

- балансу реактивної потужності;
- зниження втрат у розподільчих мережах;
- підтримування заданого (необхідного) значення напруги.

Для зниження споживання реактивної потужності можливе застосування методу КРП в якості спрощеного способу – впливати на приймач, або використання комплектних пристроїв у місцях розподілення електроенергії.

Розподільчі мережі 10кВ використовуються для передачі електричної енергії від розподільних підстанцій (РП) лініями, що встановлюються на місцевості (міста, селища) за радіальною (рис. 1.3), магістральною (рис. 1.4) або радіально-магістральною розподільчою мережею до $\text{КТП} - 0,4\text{кВ}$.

Обмеження за потужністю, що передається мережами середньої напруги 10кВ залежать від протяжності ліній, за допустимим перегрівом проводів/кабелів і за нормованими втратами напруги в мережах (усереднені значення довжини повітряних ланок середньої напруги 10кВ , за умовами зниження перерізу проводів, приймаються $4-8\text{кВ}$ при щільності навантаження $6-24\text{МВт/км}^2$) [5].

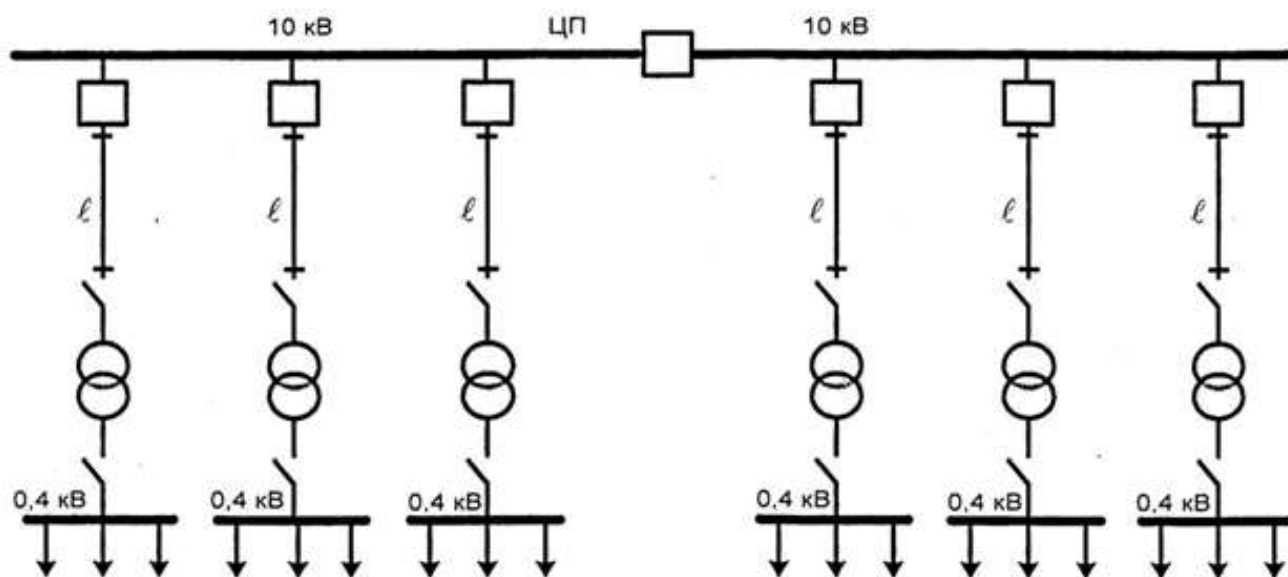


Рисунок 1.3 – Радіальна розподільча мережа.

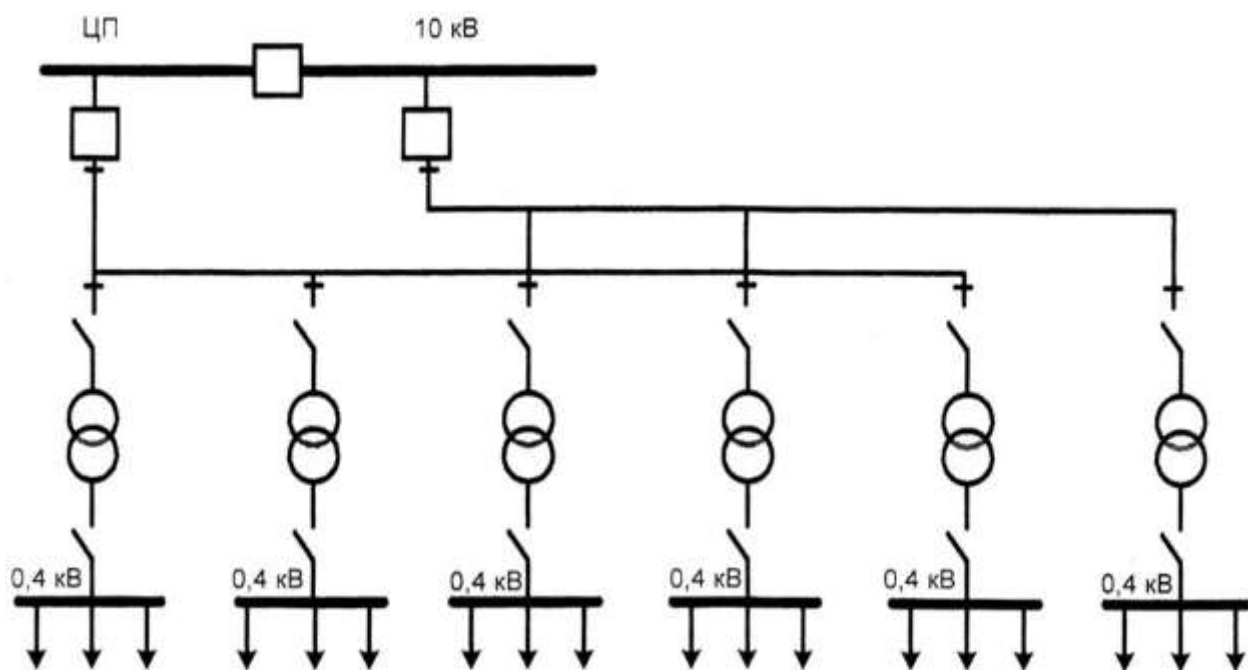


Рисунок 1.4 – Магістральна розподільча мережа.

При постійних значеннях розподільчої потужності, показника напруги та опору, значення втрат активної потужності в розподільчій мережі 10 кВ обернено пропорційні квадрату коефіцієнта потужності щодо навантаження [2].

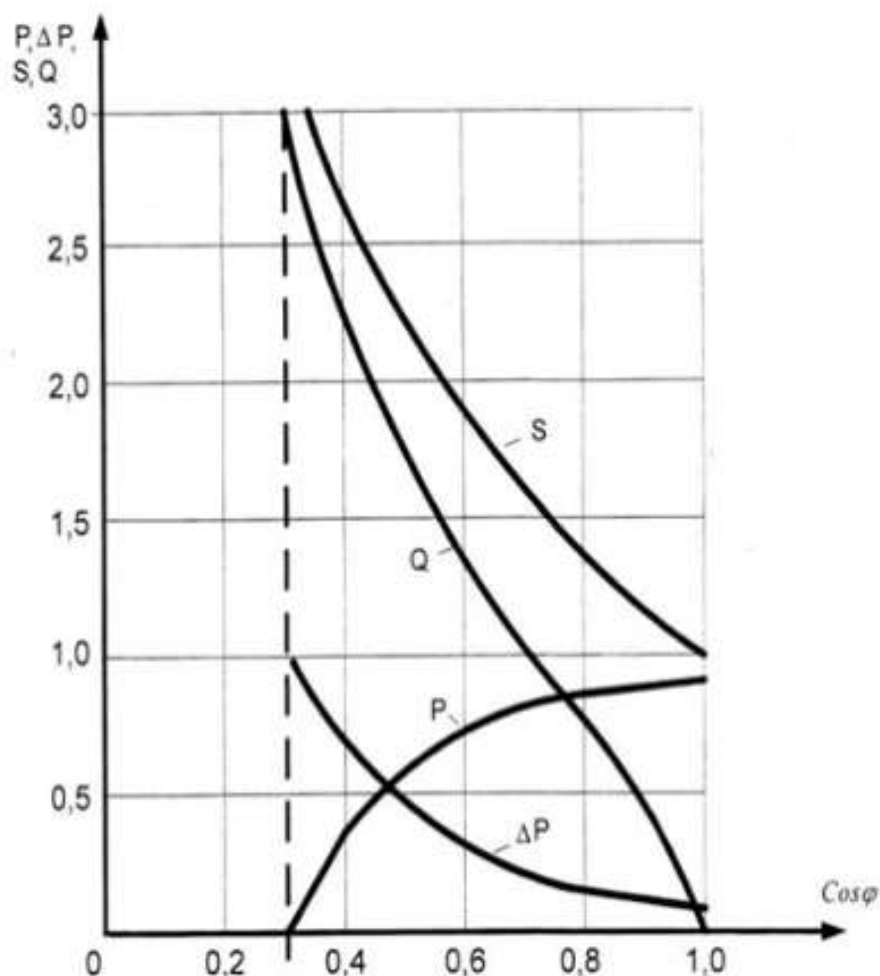


Рисунок 1.5 – Графік зміни основних складових за різних значень коефіцієнта потужності.

Як показує аналіз (рис. 1.5), при зниженні коефіцієнта потужності до значення $\cos(\varphi) \cong 0,3$ вся введена активна потужність (ΔP) витрачається в розподільчій мережі, а споживання активної (P) та реактивної (Q) складових як і повної потужності (S) наближається до трикратних значень.

Крім цього, підвищене завантаження розподільчих ліній реактивним струмом призводить до спаду напруги, а різкі коливання значень реактивної потужності – коливання напруги та невідповідність значень *ПЯЕЕ*.

Слід зазначити, що середній коефіцієнт потужності в розподільчих мережах 10кВ досягає порядку 0,83–0,86, втрати активної потужності після підключення *КБ* зменшуються до 2 разів [5].

Низьке значення $\cos(\varphi)$ викликає надмірне завантаження реактивною потужністю розподільних підстанцій, створюючи потребу збільшення потужності чи числа силових трансформаторів. Втрати активної потужності в трансформаторах 10/0,4 кВ мають складнішу залежність у порівнянні з ЛЕП за відсутності КРП на низькій стороні та обчислюються за формулою [3]:

$$\Delta P_T = (\Delta P_{XX} + K_s^2 \cdot \Delta P_{KЗ}), \quad (1.6)$$

де ΔP_{XX} , $\Delta P_{KЗ}$ – відповідно, магнітні та електричні втрати трансформатора;

K_s – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Зростання кількості ЕП через розвиток та будівництво нових підприємств призводить до потреби у спорудженні новітніх розподільних підстанцій. При цьому установки КРП можуть розглядатися як альтернатива встановлення нових КТП. При під'єднанні КБ з'являється запас потужності трансформатора, який можна отримати з виразу:

$$S_{зап} = S_{ном} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{K_s^2 + (Q - Q_{KB})}{S_{ном}^2}} \right], \quad (1.7)$$

де Q – максимальна пропускна спроможність трансформатора за реактивною потужністю;

Q_{KB} – потужність КБ на шинах 0,4 кВ;

K_s – коефіцієнт завантаження.

Одна з особливостей ПЛ–10 кВ – схожі значення таких параметрів, як активні та індуктивні опори.

Це значно ускладнює завдання КРП, через те, що компенсація активної та індуктивної складових і падіння напруги вимагає встановлення нових технічних пристроїв. До таких засобів, наприклад, відносяться вольт додаткові трансформатори та поздовжні КБ. Робота розподільчих ліній КБ в режимі передавання потужності зазвичай багаторазово перевищує номінальну

потужність лінії, оскільки в $ПЛ-10кВ$ значення натуральної потужності не значне.

1.4 Аналіз способів КРП

КРП влаштована так, що комплектні установки *КБ* встановлюються на шини розподільних щитів. При ввімкненні в розподільчу мережу конденсаторів можна домогтися зниження споживання реактивної складової, що надходить через трансформатори з боку мережевого постачальника електроенергії та підвищити значення $\cos(\varphi)$. Нормоване значення $\cos(\varphi)$ варіюється від 0,90 до 0,95, так само енергопостачальні організації вводять штрафні санкції за низький показник $\cos(\varphi)$ зі сторони споживача [1, 5].

Крім цього, при підвищенні значення $\cos(\varphi)$ від 0,90 до 0,99 номінальний струм знижується на 4%, а потужність комплектної установки *КБ*, встановлена для цього, збільшується в 2 рази, а ціна установки зростає в 1,75 разів, що за розрахунками недоцільно.

Установки для *КРП* поділяються за типом підключення: загальна та індивідуальна.

Компенсація в індивідуальному порядку виконується на кожному навантаженні окремо, незалежно від інших споживачів (клеми електродвигуна).

Індивідуальна компенсація – технічне рішення. Конденсатор встановлюється за показниками споживаної потужності та $\cos(\varphi)$ електродвигуна, завдяки чому реактивна потужність компенсується протягом усього часу роботи. Позитивом даного виду компенсації полягає у тому, що за мінімальних витрат можна досягти високого показника завантаження даної установки (рис. 1.6) [5].

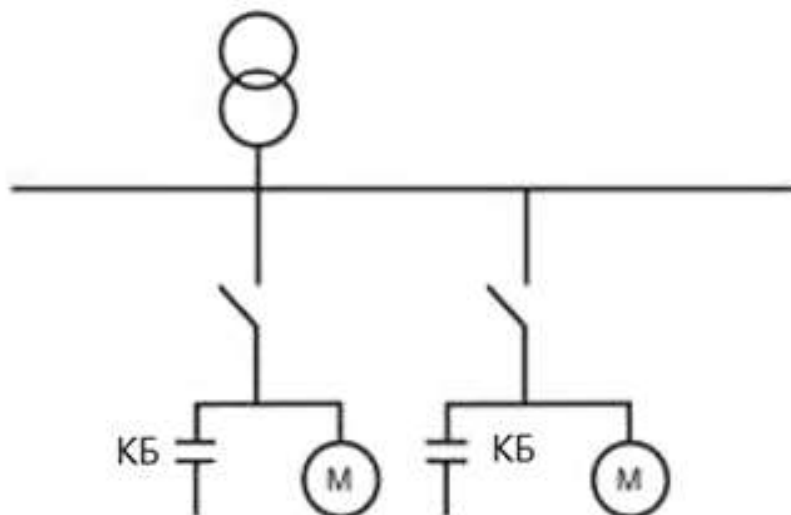


Рисунок 1.6 – Індивідуальна компенсація.

Компенсація централізованим методом будується на установках *КРП* у місці розподілу електричної енергії – на шинах *КТП* або у ввідно-розподільному пристрої (*ВРП*). Необхідно виконувати правильний підбір ступеней компенсації, налаштовану на зміну максимальних і номінальних навантажень, що впливає на вибір схеми компенсації (рис. 1.7) [5].

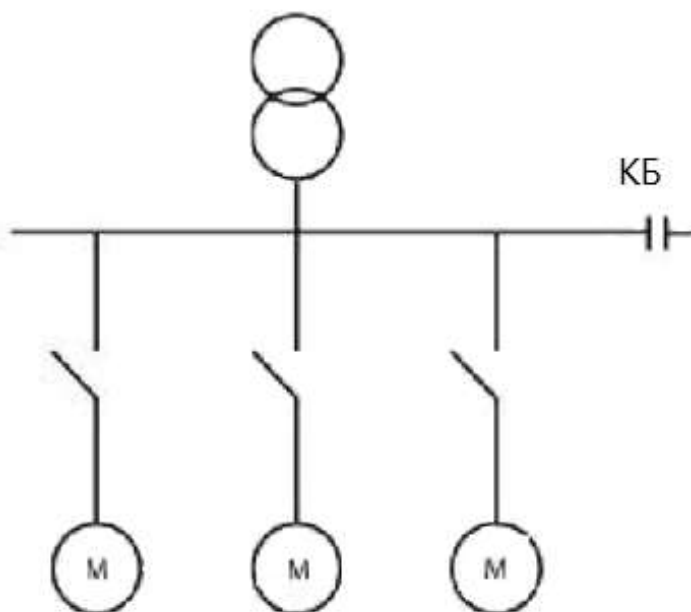


Рисунок 1.7 – Компенсація централізованим методом.

На всіх підприємствах час максимуму та мінімуму навантажень залежить від технології виробництва.

Тому, застосування індивідуального варіанту *КРП* є недоцільним, оскільки встановлення конденсаторів на велику кількість обладнання призводить до великих витрат. Коефіцієнт завантаження конденсаторів в цьому випадку занадто малий, що впливає на термін окупності установки.

Компенсація методом індивідуального підходу є більш ефективною за великої реактивної потужності щодо числа споживачів, які вимагають велике навантаження за постійний відрізок часу.

Компенсація централізованим способом підходить для великої кількості навантажень з різними коефіцієнтами попиту протягом робочої зміни. В даному випадку значення споживання навантаження не завжди часто змінюється, тому, для цих завдань, використовуються комплектні *КРП* зі ступенями регулювання в автоматичному режимі [5].

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто засоби зниження впливу нелінійного навантаження в електричних мережах 10 кВ та проведений їх аналіз.

Ефективність компенсації лише за рахунок застосування *БВП* (без застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв) досить висока. Це дозволяє у багатьох випадках суттєво знизити спотворення від потужних перетворювачів як на ланках 10 кВ так і в ланцюгах 0,4 кВ.

У реальних електричних мережах ступені компенсації дещо відрізнятимуться від розрахункових, що обумовлено відмінністю параметрів електроустановок від ідеальних, а також різноманітністю режимів їхньої роботи.

Застосування пристроїв *КРП* та придушення *ВГ* у мережах 10 кВ попри значні фінансові витрати, необхідні та доцільні, тому, застосування та встановлення пристроїв зниження негативного впливу споживачами з нелінійним

навантаженням мережу середньої напруги, залежить не тільки від техніко-економічного стану мережі, а й від можливість вкладати в їх розвиток та вдосконалення.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Особливості компенсації реактивної потужності споживачів з нелінійним навантаженням

Розподільні електричні мережі 10 кВ здійснюють транспортування реактивної потужності до споживачів, які володіючи активним опором визивають додаткові втрати електричної енергії та потужності. Перетоки реактивної потужності призводять до зниження пропускної здатності ліній електропередачі та трансформаторів, або вимушеного збільшення перетину проводів, прокладання додаткових кабельних ліній, заміни трансформаторів на вищу номінальну потужність. При цьому, значення реактивних потоків потужності можна зменшити та навіть повністю виключити встановивши поблизу місць споживання реактивної складової статичні конденсатори, тобто, обмін енергією відбувається між індуктивністю та ємністю ланцюга. Між індуктивністю одного й того ж джерела та енергією буде здійснюватися обмін лише некомпенсованою частиною енергії [6-9].

Споживачі з нелінійним навантаженням, що характеризується спотвореною синусоїдою як за струмом так і за напругою, є дещо некоректно проводити аналіз режимів як для кола з лінійними параметрами. В цьому випадку варто розглянути особливості *КРП* для лінійних та нелінійних ланок кола.

Первинно розглянемо варіант підведення напруги $e(t)$, яка рівна $e(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega t)$, до лінійного реактивного навантаження, через яке буде протікати струм, що зсунутий на кут φ по відношенню до напруги. Межі кута φ для індуктивного навантаження – $0 < \varphi < 180^\circ$; для ємнісного – $180^\circ < \varphi < 360^\circ$. Отже, миттєве значення струму буде: $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, а миттєве значення потужності $s(t)$ визначаємо за виразом [6]:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \\
 &= U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi).
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Як видно з формули (2.1), миттєва сумарна потужність розраховується як різниця активної потужності (P) (навантаження споживача) та реактивної потужності (Q) (присутня в ланці без виконання роботи). Проведемо аналіз процесів у лінійній ланці на основі діаграми на рис.2.1 [6, 10].

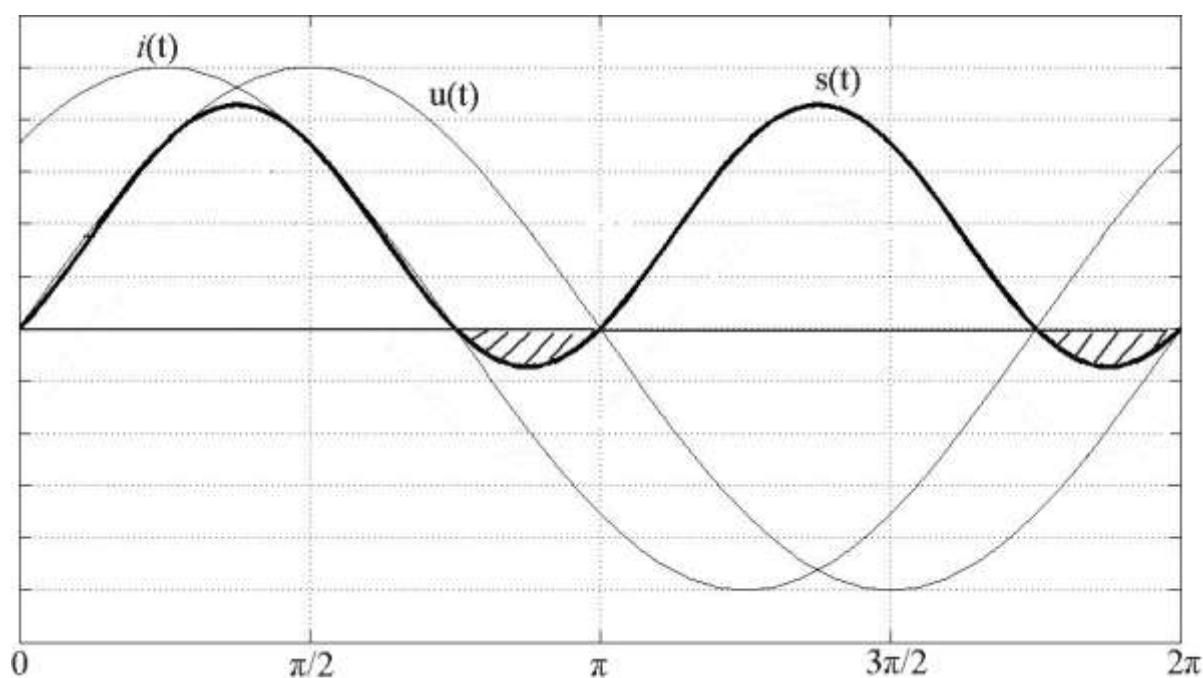


Рисунок 2.1 – Діаграми процесів у лінійній ланці.

Аналіз діаграм на рис.2.1 показав, що частина потужності віддається назад до джерела від навантаження, оскільки загальна потужність на частині ділянки – від’ємна (заштрихована область). Крім цього, присутність реактивної складової обумовлює зсув фаз між напругою та струмом i , відповідно, зміну $\cos(\varphi)$ від нуля, призводить до зниження потужності яка надходить до навантаження від джерела. При узгодженні реактивних опорів навантаження та джерела ($X_{ген} = -X_{нав}$) можливо усунути реактивну складову загальної потужності [7].

Представимо миттєву загальну потужність для встановленого режиму у

виді:

$$s(t) = i_a(t) \cdot e(t) + i_p(t) \cdot e(t), \quad (2.2)$$

де $e(t) = E_{\max} \cdot \sin(\omega t + \psi)$ – миттєве значення ЕРС мережі;

i_a , i_p – активна та реактивна компоненти струму мережі, відповідно:

$$i_a = I_m \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\omega t + \psi) = I_a \cdot \sin(\omega t + \psi); \quad (2.3)$$

$$i_p = -I_m \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega t + \psi) = I_p \cdot \cos(\omega t + \psi). \quad (2.4)$$

Представлені вирази (1.3) та (1.4) показують синфазність активної та реактивної компоненти струму по відношенню до напруги мережі.

В нелінійних ланках струм має несинусоїдну форму, відповідно, для КРП необхідно першу та вищі гармоніки за реактивною потужністю компенсувати.

Діаграми на рисунку 2.2 пояснюють перебіг компенсації.

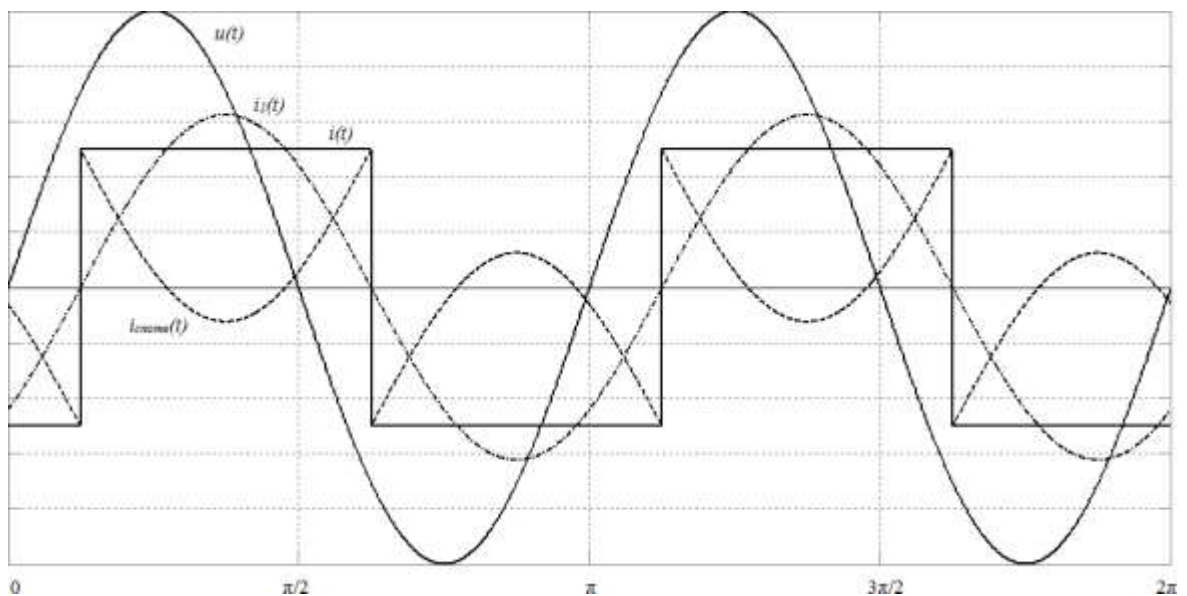


Рисунок 2.2 – Діаграми процесів у нелінійній ланці.

Діаграма відображає зміну напруги мережі $u(t)$, струму мережі $i(t)$, струму першої гармоніки $i_1(t)$ та сумарного струму спотворень складовими вищих гармонік $i_{\text{спотв}}(t)$. За виразами (1.3) та (1.4) можливо компенсувати

складові $i_1(t)$ та $i_{\text{спотв}}(t)$.

В нашому випадку необхідно визначити період проходження перехідного процесу для вибору установки $KPII$ за часом відхилення значень струмів у вітках від номінальних значень.

Дослідження перехідних процесів в ланках електричного кола здійснюється побудовою рівнянь із використанням другого закону Кірхгофа та для визначення значень перехідних струмів – розв’язку лінійного диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами з виділенням складових які необхідно компенсувати [7].

Теоретичні дослідження [5, 6] показали, що для $KPII$ та вибору установки доцільно застосувати алгоритм керування [6].

При розробці алгоритму аналізуємо два випадки проходження перехідного процесу: короткотривалий та довготривалий. Як правило час короткотривалого перехідного процесу є меншим за період напруги та спровокований в основному комутацією навантажень (рис. 1.3).

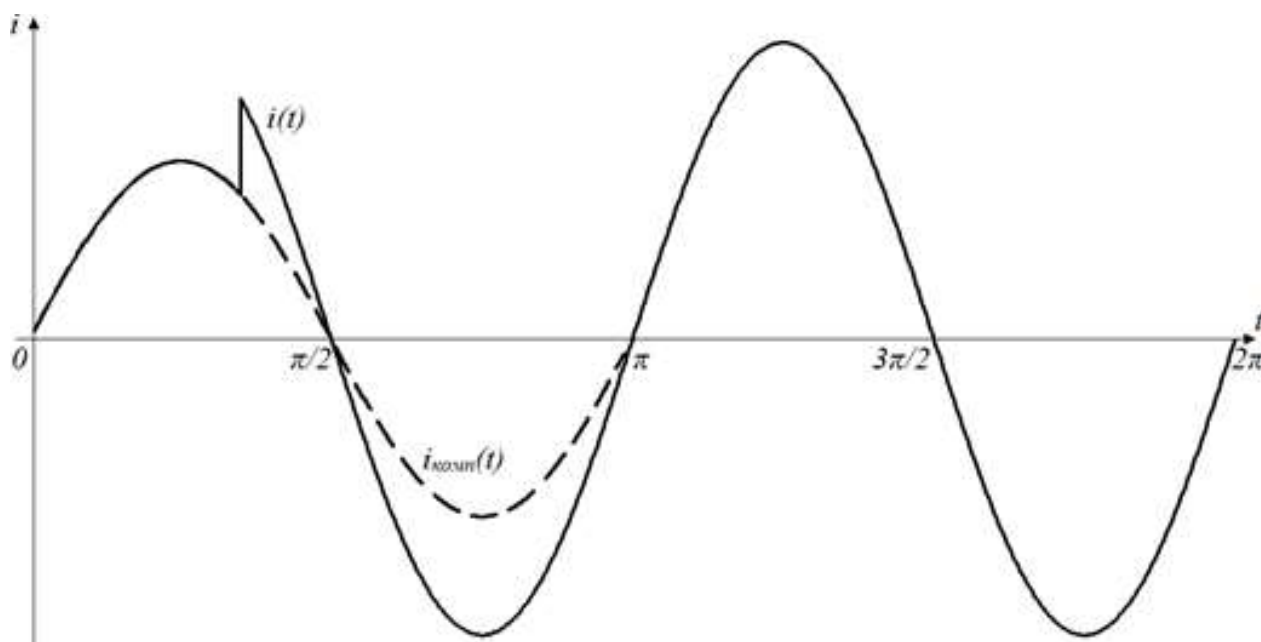


Рисунок 2.3 – Компенсація при короткотривалому перехідному процесі.

З діаграми (рис. 2.3) зрозуміло, яку складову струму необхідно компенсувати (штрихова лінія).

При довготривалому перехідному процесі ($i_{н.н.}$) (рис.2.4) за значення вільної складової струму (рис. 2.4, штрихова лінія) необхідно визначити енергетичну ємність установки *КРП* з використанням відношення [6, 10-12]:

$$W_{комп} = C \cdot U_{комп}^2 / 2, \quad (2.5)$$

де C – ємність конденсатора компенсатора;

$U_{комп}$ – напруга компенсатора (постійний струм).

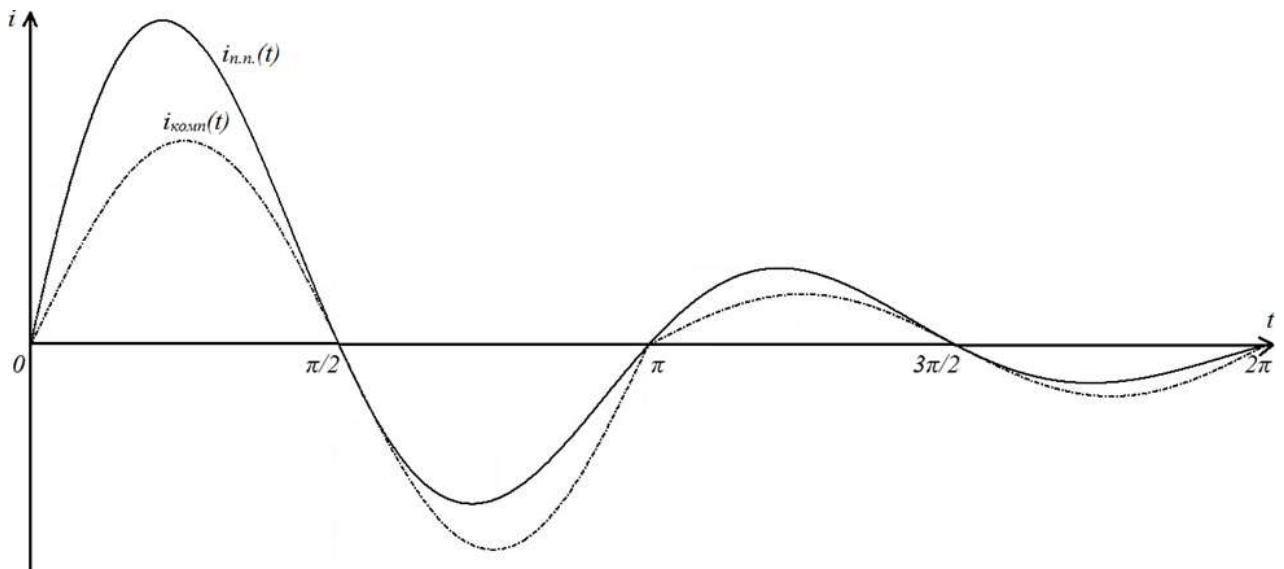


Рисунок 2.4 – Компенсація при довготривалому перехідному процесі.

Якщо енергії $W_{комп}$ для повної компенсації струму $i_{комп}$ достатньо, то решта енергії застосовується для *КРП* мережі.

2.2 Метод поперечної ємнісної компенсації реактивної потужності

Як свідчить зарубіжний досвід [14-16], для зниження показника реактивної потужності нелінійного навантаження та, відповідно, реактивної потужності лінії в цілому варто застосовувати метод розподільчої поперечної ємнісної

компенсації (*РПСК*) для виконання якої застосовують метод використання шунтових *КБ* (рис. 2.5), які вмикаються паралельно на шини підстанції та використовуються для генерації реактивної потужності в мережі.

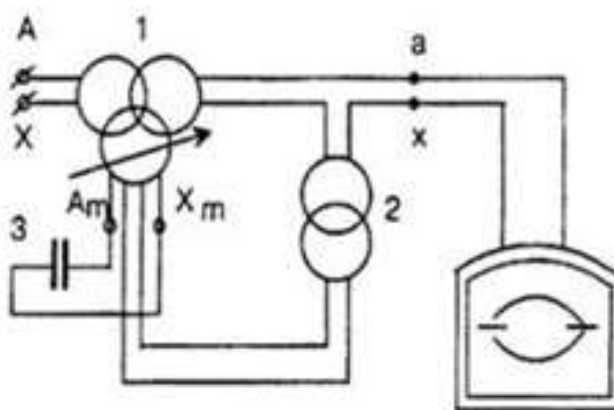


Рисунок 2.5 – Виконання поперечної ємнісної *КРП*.

Поперечна ємнісна *КРП*, що виконується паралельним з'єднанням клем конденсаторних батарей поєднанням індуктивного та ємнісного опорів, струм у нерозгалуженій частині мережі виражається геометричною сумою струмів індуктивності та ємності.

Індуктивний струм запізнюється від напруги, а ємнісний випереджає. При певному показнику ємності, сумарний струм завжди нижче індуктивного струму навантаження, внаслідок чого значення коефіцієнта потужності зростає. Збільшення коефіцієнта потужності навантаження при використанні джерел реактивної потужності допомагає збільшувати пропускну здатність мережі та активне навантаження силових трансформаторів без їх заміни на потужності вищого рівня.

При поперечній ємнісній *КРП* та при зниженні струмового навантаження можна виділити зниження активної потужності, зростання значення напруги на лінії та зменшення його втрат у всіх точках розподільчих мереж. Найкраще

встановлювати конденсаторні батареї якомога ближче до обладнання споживачів електричної енергії.

Доведено [12], що за протяжності розподільчих мереж 250 км, стаціонарні режими розподілу енергії можна розглядати за допомогою схем Π -подібної або T -подібної схеми заміщення [7].

Взявши до аналізу поперечну ємнісну компенсацію з урахуванням можливості штучного отримання номінального режиму та хвильову природу розподілу енергії дослідимо втрати напруги на коротких розподільчих лініях 10 кВ.

Характеристика напруги (U_1) на одному кінці розподільчої лінії залишається постійним при використанні регулювання, а на стороні високої робочої напруги ($U_{B.P}$), передавання напруги по розподільчій мережі можливо отримати за виразом [11]:

$$\frac{U_2}{U_1} \cong 1 - 1/2 \cdot \left(\frac{Q_2}{P_{нав}} \cdot \lambda - \frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_{B.P}} \cdot \sin(\varphi) \right)^2 - \left(\frac{\rho \cdot J \cdot \ell}{U_{B.P}} \cdot \cos(\varphi) + \frac{Q_{екв}}{P_{нав}} \cdot \lambda \right), \quad (2.6)$$

де ρ – питомий погонний опір проводу, $\rho = 28,3 \text{ Ом} \cdot \text{мм}/\text{км}$;

J – густина струму в проводі;

$P_{нав}$ – активна потужність, що передається лінією, $P_{нав} = 3 \cdot U_2 \cdot I \cdot \cos(\varphi)$;

Q_2 – реактивна потужність, яка споживається навантаженням,
 $Q_2 = P \cdot \tan(\varphi)$;

$Q_{екв}$ – еквівалентне реактивне навантаження лінії ($KPII$),
 $Q_{екв} = 3 \cdot \tan(\varphi) - 3 \cdot U_2^2 \cdot (\omega \cdot C \cdot \ell)$, де C, ℓ – ємність компенсатора та довжина лінії, відповідно.

Інші втрати напруги в мережі, залежать тільки від активного опору та можуть бути знижені підключеними вольт додаткових трансформаторів.

В мережах із обмеженою протяжністю (кабельні лінії), обчислення втрат активної потужності можна здійснювати нехтуванням ємнісним струмом [11]:

$$\Delta P \cong 3 \cdot I^2 \cdot (R_0 \cdot \ell) = 3 \cdot J^2 \cdot \rho \cdot F \cdot \ell, \quad (2.7)$$

де F – січення кабельної лінії, мм^2 .

Реактивна потужність, що споживається власне розподільчою мережею, знаходиться за виразом:

$$Q_{\text{Л}} \cong 3 \cdot I^2 \cdot (\omega \cdot L_0 \cdot \ell) - 3 \cdot U_2^2 \cdot (\omega \cdot L_0 \cdot \ell) = 3 \cdot (F \cdot J^2) \cdot Z_{\text{хв}} \cdot \lambda - P_{\text{нав}} \cdot \lambda \cdot (U_{\text{В.Р}}), \quad (2.8)$$

де $Z_{\text{хв}} \cdot \lambda$ – хвильовий опір і хвильова довжина кабельної лінії, відповідно.

Хвильова довжина лінії визначаємо за формулою:

$\lambda = (\omega / \mathcal{G}_{\text{ем.хв}}) \cdot \ell = (314,16 / 2,945) \cdot 10^{-5} \cdot \ell \cong 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot \ell, (1/\text{км})$ та при довжині від 20 до 140 км приймаємо значення $\lambda = 0,0107 - 0,1605$, відповідно, тут: $\mathcal{G}_{\text{ем.хв}} \cong 2,945 \cdot 10^5 \text{ км/с}$ – швидкість проходження вздовж лінії електромагнітної хвилі.

При необхідності великого значення $KPII$ для забезпечення $\cos(\varphi) = 0,98$ та великих втратах напруги на лінії: $U_2 = U_{\text{В.Р}}$, відношення реактивної потужності лінії до потужності, яка передається, можна обчислити із залежності:

$$\frac{Q_{\text{Л}}}{P} = \left[\left(\frac{P}{P_{\text{нав}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \lambda. \text{ Із рівності зрозуміло, що тільки при роботі в номінальному}$$

режимі, реактивна потужність на лінії може бути повністю скомпенсована, тобто $Q_{\text{Л}} = 0$.

За умови, що $P > P_{\text{нав}}$, що є допустимо, необхідно щоби еквівалентна ємність компенсатора для $KPII$ була вибрана в відповідності з рівнянням:

$$Q_{\text{екв}} = \left(\frac{P}{P_{\text{нав}}} \right)^2 \cdot (C_0 \cdot \ell).$$

Потужність джерел для $KPII$ на розподільчій лінії знаходимо за

формулою:
$$\frac{Q_{\text{Л}}}{P} = 2 \cdot \left[\text{ctg}(\lambda_i) - \sqrt{\frac{1}{\sin^2(\lambda_i)} - \left(\frac{P}{P_{\text{нав}}} \right)^2} \right],$$
 де в якості λ_i приймаємо

значення хвильової довжини окремо взятої i -ої ділянки лінії між двома однаковими джерелами $KPII$.

Використання методу поперечної ємнісної компенсації дозволить зменшити значення реактивної потужності навантаження та реактивної потужності лінії. Про це свідчить і зарубіжний досвід, де для цього широко використовуються щоглові конденсаторні установки [14].

2.3 Дослідження компенсації реактивної потужності з фільтрацією струмів вищих гармонік

Щодо зниження реактивної складової в електричних мережах середньої потужності на практиці фахівці показали, що встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності серед інших методів отримали найкращі економічні показники ефективності [10, 11, 14-16]. Даними пристроями можна вважати: синхронні компенсатори (*СК*); *СД*, при роботі в режимі перезбудження; *СКРП*; статичні тиристорні компенсатори.

Доведено, що при близькій установці до споживачів пристроїв *КРП* можна досягнути високих показників економічної та енергетичної ефективності в розподільній мережі, тим самим знизити загальний строк окупності та затрат на заходи щодо встановлення пристроїв *КРП*. Для цих завдань підходить установка пристроїв *КРП* у споживачів із системою керування *КБ* у комплекті з фільтрами струмів *ВГ*, якщо в розподільчих лініях присутня несинусоїдальність напруги.

На сьогоднішній день пріоритетом є застосування силових фільтрів у системі *ФКП*. При встановленні на шини в щитах частково або повністю вирішуються проблеми *КРП*, що обумовлено властивостями конденсаторів фільтра виступати в ролі джерела реактивної складової на основній частоті.

Здатність фільтра здійснювати роботу за основними функціями встановлюється точністю налаштування [8]. Розроблені методики проектування *ФКП* ґрунтуються на точному налаштуванні пристроїв на відповідні гармоніки вищого порядку. Через дискретність показників ємності конденсаторів та індуктивності проєктованих підприємствами реакторів, виконати точне

налаштування пристрою на частоту до значення гармоніки вищого порядку дуже важко. Також, при експлуатації *ФКП* варто брати до уваги старіння окремих секцій *БК*. Ці проблеми можуть призвести до відхилення частоти настроювання фільтра та призводить до підвищення значень несинусоїдальності в мережі та перевантаження за струмами *ВГ*.

За високих показників економічної ефективності *КРП* у країнах лідерах промисловості на дослідження та розробку методики відводяться великі кошти. Наприклад, у таких країнах, як *Канада*, *Польща*, *Франція*, показник потужності конденсаторних пристроїв варіюється в 25–30 % від активної пікової потужності, а в *Китаї* та *США* – близько 40 %. У *США* потужність установок для *КРП* складає 90 % від усієї потужності генераторів. У багатьох країнах в роботі працюють методики за якими генерування реактивної потужності електричними станціями здійснюється за допомогою підвищення відсотка реактивної потужності, що виробляється комплектними конденсаторними установками [11].

Коефіцієнт реактивної потужності $\operatorname{tg}(\varphi)$ в умовах максимального навантаження, в таких країнах як *Китай* та *США*, підтримується на рівні 0,2–0,4, тобто $\cos(\varphi) = 0,98–0,92$. Також у *США* розвиваються розподільчі мережі з показником максимальних навантажень при $\operatorname{tg}(\varphi) = 0$ [12].

У відповідності до нормативів [10] граничні значення коефіцієнта реактивної потужності в години навантажень – з 7 до 23 години для розподільних ланок 10 кВ повинні становити: $\operatorname{tg}(\varphi) = 0,4$, відповідно $\cos(\varphi) = 0,928$.

Розглянемо особливості застосування конденсаторних батарей у сучасних умовах на прикладі компресорного відділення машинобудівного заводу.

Як показав досвід впровадження конденсаторних батарей цього підприємства, для надійної та ефективної роботи цих батарей в умовах експлуатації відіграє якість електричної енергії в точках їх під'єднання. Зокрема,

це стосується наявності в електричних мережах вищих гармонійних складових струму та напруги. Крім негативного впливу $BГ$ на надійність та довговічність електрообладнання електричних мереж та споживачів, на точність обліку та втрати електроенергії, при встановленні конденсаторних батарей в електричних мережах можуть виникати резонансні явища між ємнісним характером конденсаторних батарей та індуктивним опором мережі живлення. Ці резонанси за певних умов можуть посилити вищі гармоніки та їх вплив на обладнання та навіть призвести до виходу з ладу конденсаторних батарей через перенапругу на конденсаторах.

Як приклад, проведемо аналіз результати перевірки взаємного впливу параметрів якості електроенергії та режиму роботи конденсаторної установки, яка під'єднана до першої секції шин ($СШ-1$) напругою $0,4\text{ кВ}$ компресорної станції.

Результати вимірювання показників якості електроенергії за допомогою проведених до підключення конденсаторної установки ($KУ$) до шин компресорної станції, показали істотне перевищення допустимих значень за величиною напруги за окремими гармонійними складовими (рис. 2.6). Ситуація не покращала й після підключення $KУ$ (рис. 2.7). Відхилення напруги від номінального на $СШ-1$ перевищило 12% , збільшився й коефіцієнт несинусоїдальності за напругою (рис. 2.8), а коефіцієнт несинусоїдальності за струмом зріс у $2,5$ рази (рис. 2.9).

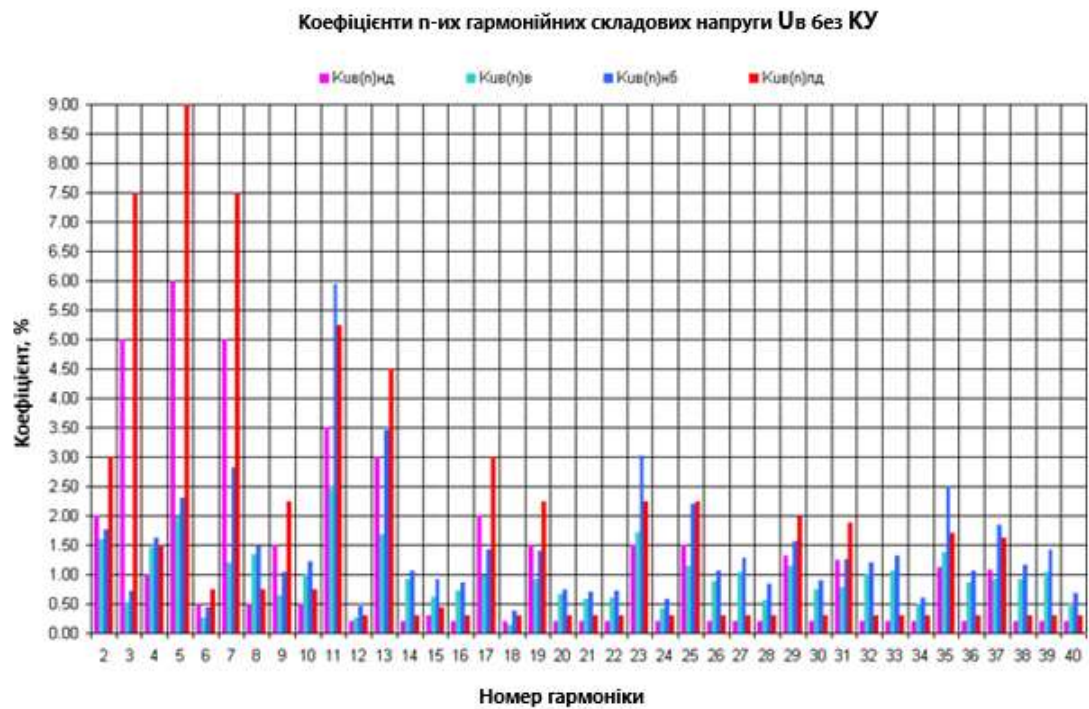


Рисунок 2.6 – *ПЯЕЕ* допустимих значень за окремих гармонійних складовими без КУ.

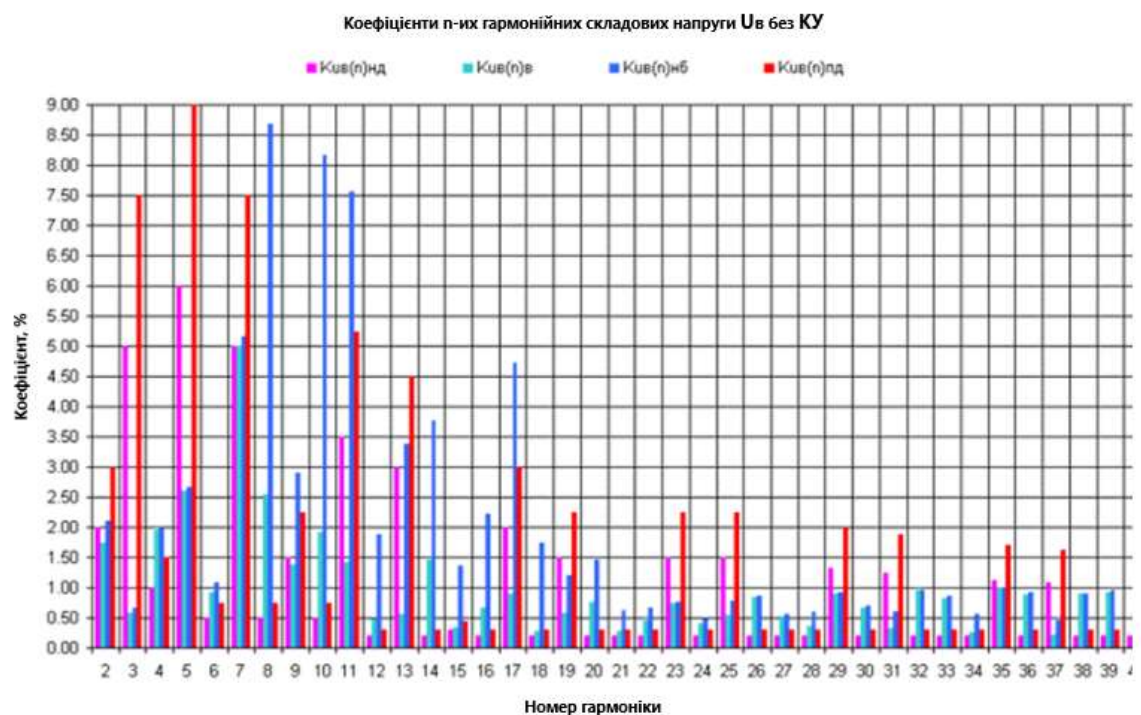


Рисунок 2.7 – *ПЯЕЕ* допустимих значень за окремих гармонійних складовими з КУ.

Як видно з рисунка 2.7 відбувається зростання амплітуди гармонік: 3-ї, 5-ї, 8-ї, 10-ї, а перевантаження KU за струмом складає 50 % відсотків.

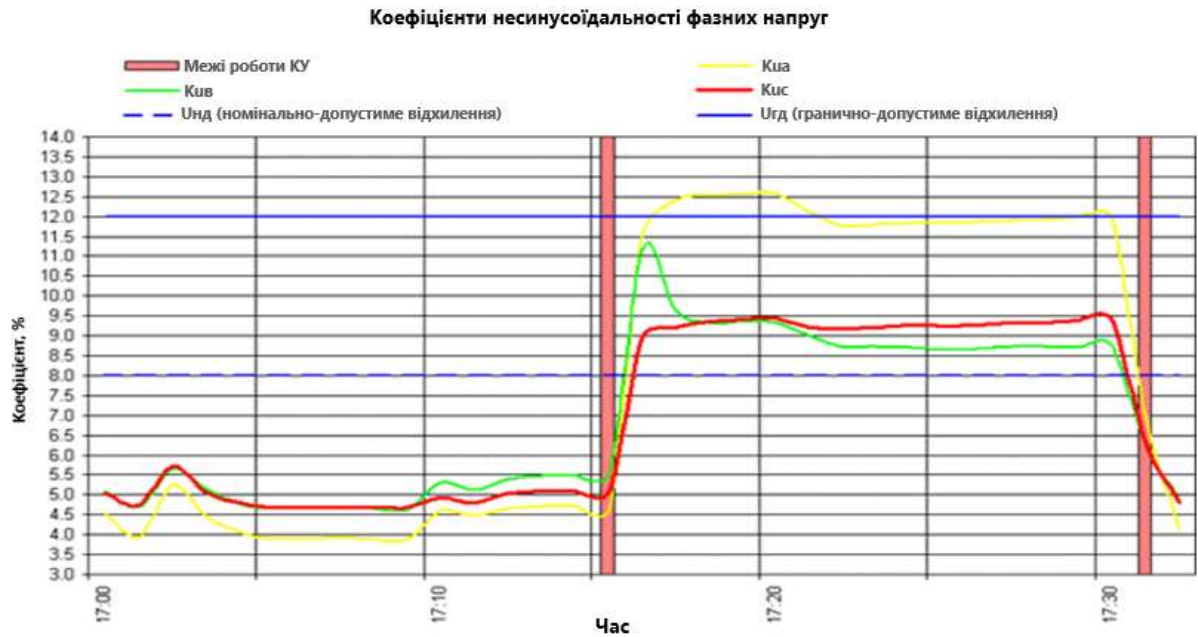


Рисунок 2.8 – Оцінка коефіцієнта синусоїдальності за напругою.

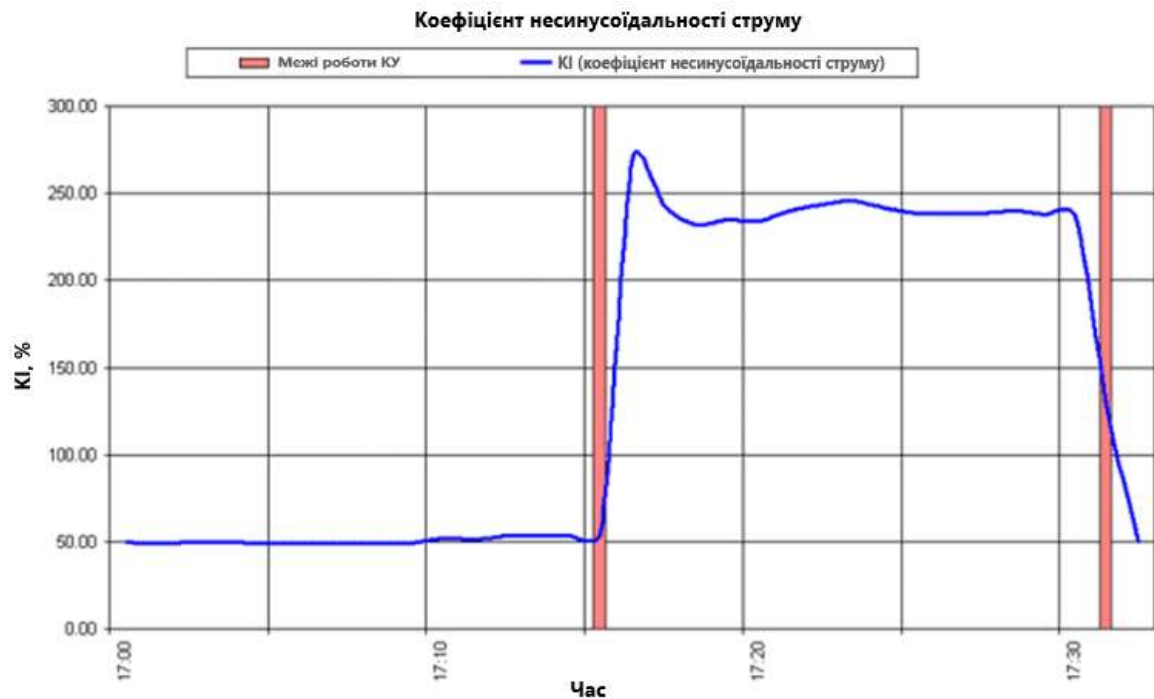


Рисунок 2.9 – Оцінка коефіцієнта синусоїдальності за струмом.

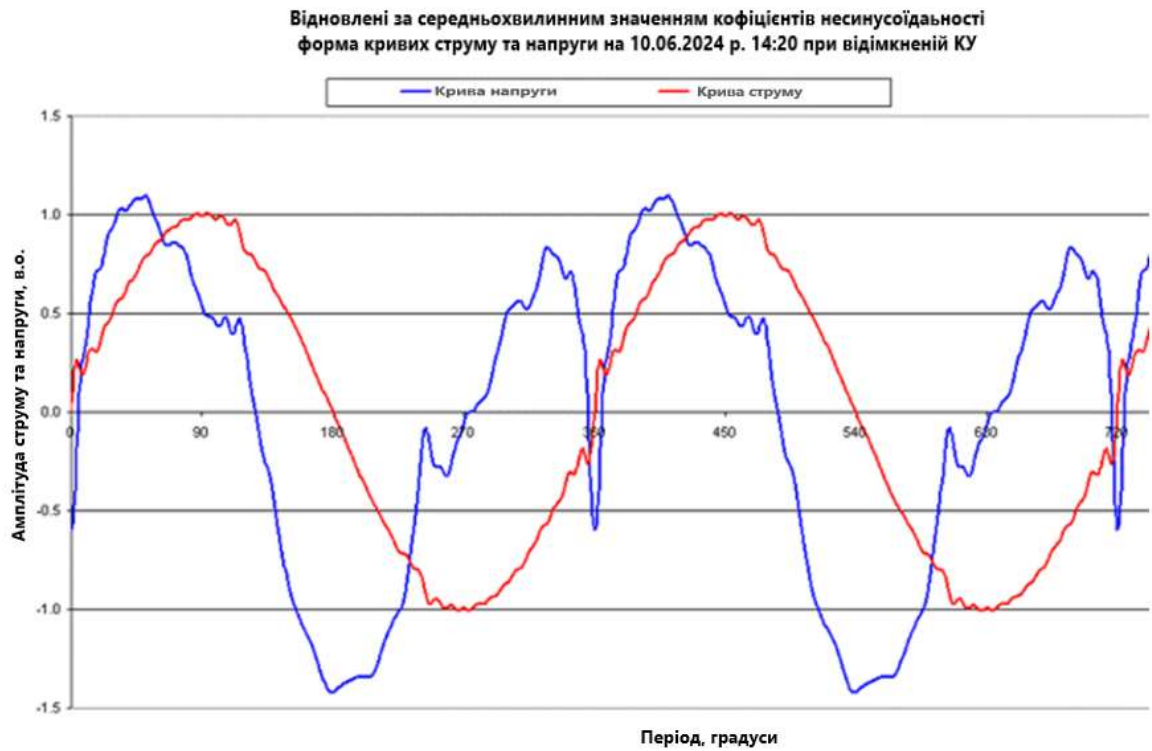


Рисунок 2.10 – Графік зміни форми струму при вимкненій КУ.

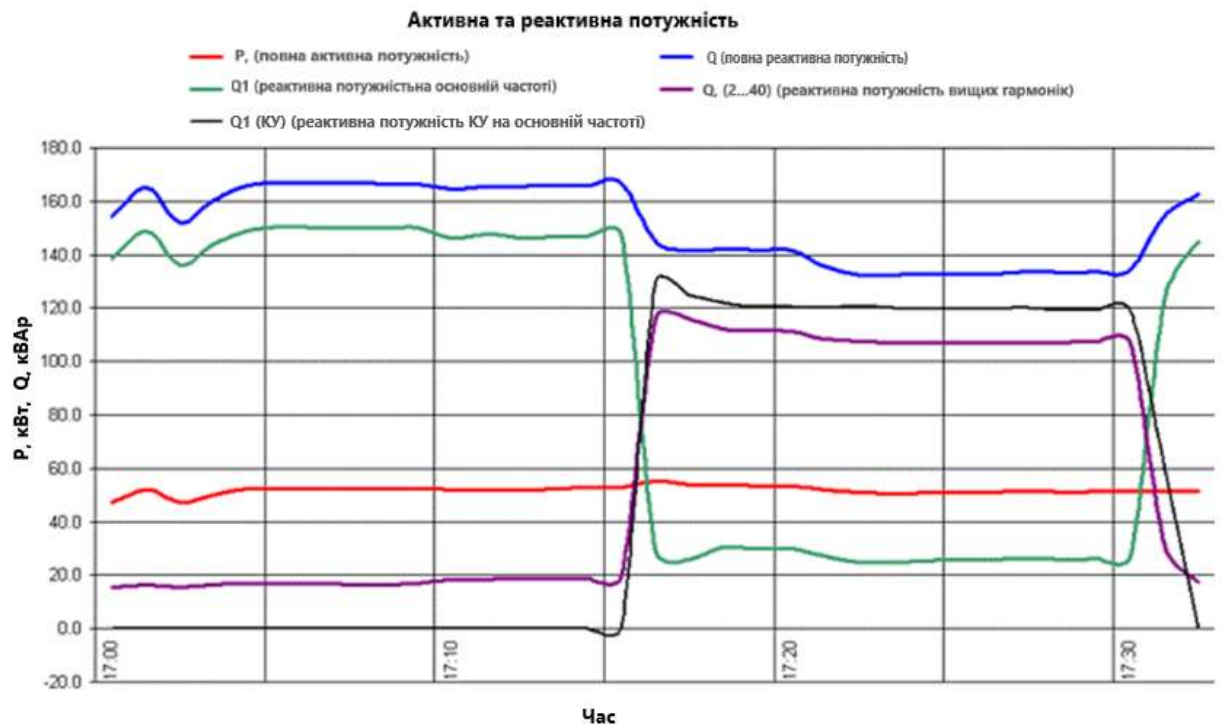


Рисунок 2.11 - Графік споживаної потужності.

За графіком споживаної потужності (рис. 2.11) видно, що внаслідок значної зміни форми струму при відключеній KU (рис. 2.10), що споживається підстанцією, після включення KU генерація реактивної потужності KU (120 кВАр) практично компенсована додатковим споживанням її на вищих гармоніках.

Внаслідок цього в показах лічильників електричної енергії, які враховують повну реактивну потужність, факт спрацювання блоків короткого замикання може бути практично не зафіксований. При цьому регулятор реактивної потужності KU виконав автоматичний вибір та під'єднання ступенів конденсаторів з розрахунку першої гармоніки як напруги так і струму. У регулятора спрацював захист від перевищення коефіцієнта несинусоїдальності.

2.4 Висновки до другого розділу

Дослідження особливостей KPP споживачів з нелінійним навантаженням показали, що для ефективного вибору заходів зниження $BГ$ необхідно проводити аналіз можливої форми проходження перехідного процесу.

Дослідженням встановлено, що застосування пристроїв для KPP та придушення $BГ$ у розподільних мережах середньої напруги необхідне.

Досліджено, що пристрої поперечної компенсації знижують втрати за напругою в вузлах споживачів, завдяки зниженню навантаження реактивної потужності за навантаженням та на лініях. Для цього пропонується використовувати щоглові конденсаторні установки.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка заходів щодо зменшення гармонійних спотворень на підприємстві

Для зменшення гармонійних спотворень напруги мережі живлення на підприємстві та приведення їх до рівня, що відповідає нормативним вимогам [2], слід дотримуватися наступного алгоритму:

А) означити електроспоживачів за схемою електропостачання на підприємстві, що належать до категорії нелінійних та визначити їх сумарну потужність. Якщо частка сумарної встановленої потужності нелінійних споживачів не перевищує 10–15 % від номінальної потужності цехового трансформатора живлення, негативних особливостей в експлуатації системи електропостачання не виникає, коефіцієнт спотворення синусоїдальності K_U не перевищує допустимого рівня [10]. При перевищенні частки сумарної потужності нелінійних споживачів 25 %, може відбуватися вплив гармонічних спотворень на функціонування інших електроспоживачів мережі та порушення нормальної роботи [18].

Перед тим як приймати рішення щодо встановлення додаткових пристроїв, необхідно здійснити діагностику електроспоживання:

- присутні значні гармонічні спотворення напруги електромережі живлення при малій частці (<10–15 % від номінальної потужності мережі) працюючих нелінійних споживачів;
- раптово збільшилися гармонійні спотворення з неозначених причин;
- зросла кількість встановлених нелінійних споживачів, що викликало зростання гармонійних спотворень;

Б) провести діагностику мережі електропостачання з виміром параметрів для оцінки частки присутніх у мережі вищих гармонік.

Вимір коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги K_U проводиться аналізатором якості електроенергії власними силами (підрозділ метрологічних

замірів) або сторонніми організаціями.

Як правило ланки електропостачання на об'єкті є частиною спільної електричної мережі, до якої підключені інші споживачі (об'єкти), які вносять свою складову в гармонійні спотворення.

Тому, діагностику електричної мережі на об'єкті рекомендується починати з виміру коефіцієнта спотворення синусоїдальності K_{U0} без підведення потужності до споживачів.

Якщо коефіцієнт K_{U0} при означених умовах має підвищене значення 4–8 %, необхідно визначити причини зростання.

Для цього необхідно:

- провести регламентні роботи: стан кабелів (проводів) електропостачання, клем, перехідних опорів силових з'єднань, фазних та «нульового» проводів, якість з'єднань заземлення корпусів ЕП;
- повторно здійснити вимір K_{U0} без підведення потужності до споживачів.
- послідовно підключаючи до мережі споживачів з нелінійним навантаженням, проводити вимір $K_{U,EP1}$, $K_{U,EP2}$, тощо, при кожному нелінійному електроспоживачі ЕП1, ЕП2 і т.д. і визначити міру кожного споживача в сумарні гармонійні спотворення.
- здійснити вимір значення сумарного коефіцієнта спотворення синусоїдальності K_U при всіх включених нелінійних споживачах;

В) Якщо після виконання діагностики мережі та проведення регламентних заходів виміряне значення K_U перевищує номінально допустим значення [5], то до нелінійних споживачів, починаючи з найбільш потужного, необхідно послідовно підключити пристрої, що послаблюють рівень вищих гармонік – ФКП, тощо, або провести реконструкцію складових частин електричної мережі підприємства.

Пропозиції практичних дій щодо зниження гармонійних спотворень в залежно від коефіцієнта гармоніки ненавантаженою електричної мережі K_{U0} та частки кожного споживача гармонійних спотворень зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Дії щодо зниження гармонійних спотворень

Коефіцієнт гармонік ненавантаженої мережі K_{U0}	Рекомендовані дії для зниження коефіцієнта гармонік у навантаженої мережі (при вимірюваному значенні K_{U0})		
	$K_U = 8,5 - 10 \%$	$K_U = 10 - 25 \%$	$K_U \geq 25 - 35 \%$
2 – 3 %	Встановити лінійні дроселі та/або дроселі постійного струму	Встановити пасивні (резонансні) фільтри	Встановити пасивні (резонансні) фільтри або активні фільтри гармонік ($A\Phi\Gamma$)
4 – 5 %	Встановити пасивні (резонансні) фільтри	Встановити пасивні (резонансні) фільтри або активні фільтри гармонік ($A\Phi\Gamma$)	Встановити активні фільтри гармонік
6 – 8 %	Визначити причину такого підвищеного значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності ненавантаженої мережі K_{U0}, близького до номінально допустимого (8 %). Можливе ослаблене з'єднання силових кабелів (проводів), незадовільні значення $ПЯЕЕ$, яка подається від енергопостачальної організації. В будь-якому разі подальше під'єднання додаткових нелінійних споживачів до мережі неприпустиме в відповідності до нормативів		

Основні способи зниження впливу гармонійних спотворень на електричну мережу поділяються на три групи: проектно-конструкторські рішення, застосування $\Phi K\Pi$ придушення гармонік та використання спеціальних пристроїв (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Основні способи зниження впливу гармонійних спотворень на електричну мережу

Проектно-конструкційні рішення			
зниження повного опору розподільчої мережі	застосування 12-імпульсного випрямляча	приєднання нелінійного навантаження до енергосистеми з високою потужністю $KЗ$	підтримка симетричного режиму роботи трифазної системи
Використання ФКП придушення гармонік			
Застосування лінійних дроселів	застосування дроселів постійного струму перетворювачів частоти	ввімкнення пасивних фільтрів	
Використання спеціальних пристроїв			
вмикання роздільних трансформаторів	вмикання магнітних синтезаторів	застосування активних фільтрів гармонік (ФКП)	

3.1.1 Проектно-конструкторські рішення

Зменшення опору в електричних мережах є одним з першочергових завдань зниження нелінійних спотворень. Провід та шини мають повний опір з індуктивною характеристикою.

Підвищення на ступінь перетину проводів призводить до зниження активного опору системи при сталій індуктивності. Економічно ефективним перетином жил проводів та кабелів вважається 95 мм^2 . При подальшому підвищенні перерізу проводів їхня індуктивність практично не змінюється. За більшої ефективності застосовуються кабелі, що з'єднані паралельно.

Застосування 12-імпульсного випрямляча. Для зниження значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності трифазних струмів джерел безперебійного живлення (ДБЖ) до рівня менше 15 % використовують 12-напівперіодні випрямлячі, що містять 6 імпульсних випрямлячів, що споживають енергію через роздільні трансформатори.

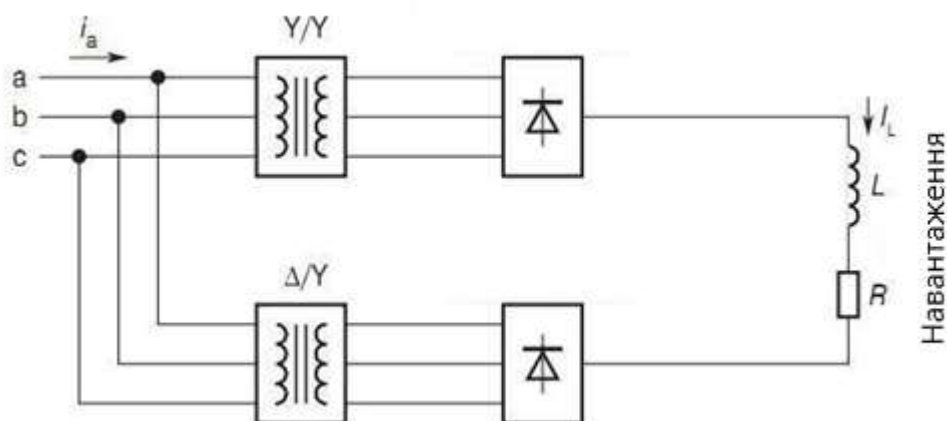


Рисунок 3.1 – Схема використання 12-імпульсного випрямляча.

Перший випрямляч заживлюється через трансформатор зі з'єднанням "зірка-зірка", а другий – "трикутник-зірка". Випрямлені напруги мають зсув фази один відносно одного 30^0 . Застосування 12-імпульсного випрямляча дозволить повністю компенсувати 5-ту та 7-му гармоніки струму випрямляча [4].

Живлення нелінійного навантаження від системи з великою потужністю КЗ вимагає заміну силових трансформаторів мінімум на ступінь на вищу потужність.

3.1.2 Застосування пристроїв придушення гармонік

Ввімкнення лінійних дроселів. Дросель з феромагнітним сердечником підсилює магнітне поле та при більшому індуктивному опорі за умови високої магнітної проникності, магнітні властивості феромагнетика підвищуються [4].

Вольт амперні характеристики дроселя можуть бути наближеними до

лінійних або нелінійних станів. Схема послідовного під'єднання лінійних дроселів змінного струму представлено на рис. 3.2 та є найпростішим способом зниження впливу $BГ$, що генеруються нелінійними навантаженнями в лініях енергетичної системи.



Рисунок 3.2 – Використання лінійних дроселів.

Ввімкнення лінійних дроселів в ланки постійної складової струму в перетворювачах частоти.

Дроселі постійного струму в перетворювачах частоти приєднуються в розрив ланки постійного струму (приєднання може бути виконане споживачем самостійно). Схема ввімкнення дроселя постійного струму показана рис.3.3.

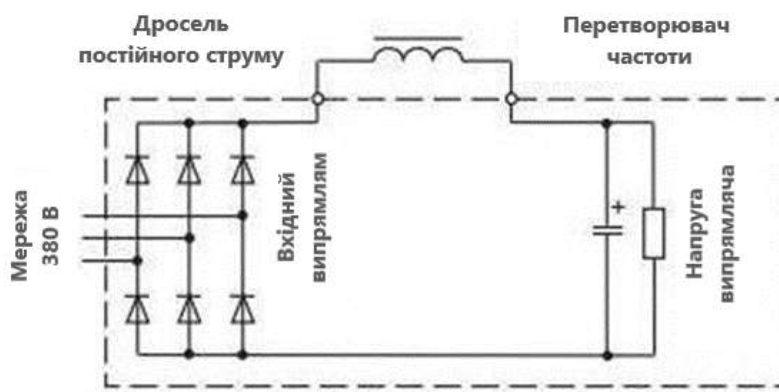


Рисунок 3.3 – Ввімкнення дроселя постійного струму.

Встановлення пасивних фільтрів.

Є випадки, коли встановлення лінійних дроселів не знижує гармонійні спотворення до необхідних значень. Тоді, доцільно встановлювати пасивні LC -

фільтри для певної (не скомпенсованої) частоти гармоніки. Для підвищення властивостей гармонійного струму дані фільтри застосовуються в системах, що мають *ДБЖ*. Приєднання фільтра на вході випрямляча при повному завантаженні *ДБЖ* призводить до зниження коефіцієнта спотворень до 7–11 %. Відхилення значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності при відсутності *LC*-фільтра може становити до 25 %. На рис. 3.4 подана схема ввімкнення трифазного *LC*-фільтра, що вмикається до трифазного *ДБЖ*. *LC*-фільтр, що містить поздовжні індуктивності та поперечні ланки, що зібрані з послідовно ввімкнених індуктивності та ємності (послідовний коливний контур), налаштований на частоту певної гармоніки.

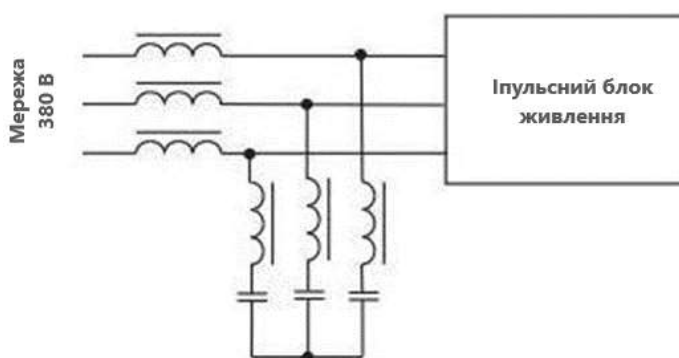


Рисунок 3.4 – Схема трифазного *LC*-фільтра.

Наприклад, при використанні фільтра на 7-му гармоніку, опір поперечної *LC*-ланки на частоті 7-ї гармоніки близька до нуля, тобто – напруга 7-ї гармоніки буде наближатися до нуля, а 7-а гармоніка в спектрі гармонік напруги буде відсутня.

3.1.3 Використання спеціальних пристроїв

Використання магнітного синтезатора. В цьому пристрої здійснюється застосування замість класичного трансформатора *K*-факторний трансформатор, який має змогу витримати нагрівання, викликане *ВГ* за рахунок додаткової

теплоємності (рис. 3.5), де, напруга на виході встановлюється поєднанням 6-ти прямокутних імпульсів від поєднаних імпульсних трансформаторів насичення, аналогічно інверторам із покроковим принципом керування [5], що дозволяє забезпечити точне регулювання імпульсів за амплітудою та тривалістю.

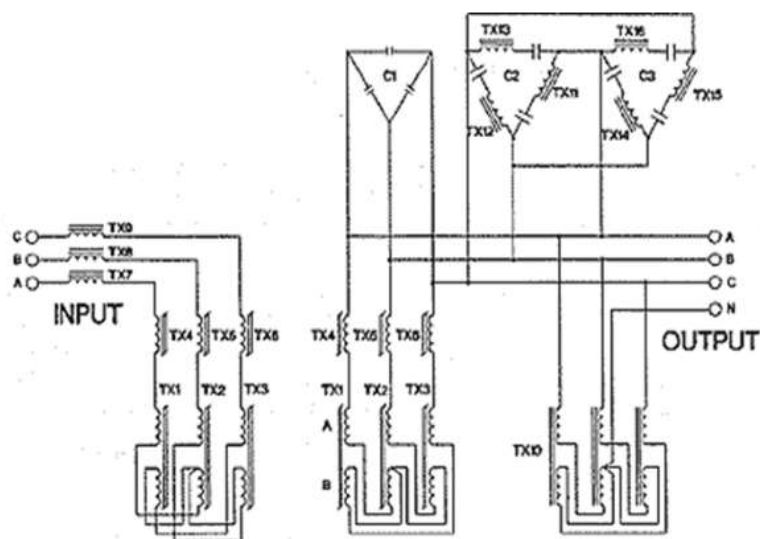


Рисунок 3.5 – Схема ввімкнення магнітного синтезатора.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності вихідної напруги пристрою не перевищує 3,5 % незалежно від ступеня спотворення напруги на вході навіть при повністю асиметричному навантаженні.

Застосування активних фільтрів гармонік (АФГ). Запропонований пристрій, який вмикається паралельно нелінійному навантаженню (рис. 3.6) та працює з електричною мережею здійснюючи аналіз гармонік нелінійного навантаження з генеруванням протилежних за фазою таких самих гармонік [4].

Таким чином, вищі гармонійні складові подавляються в точці приєднання фільтра та не розходяться в розподільну мережу від нелінійного навантаження, що дозволяє напрузі залишатися незмінною. і напруга мережі залишається незмінною.

Встановлення АФГ підтримує високе ступінь подавлення ВГ та дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності за напругою з $THD = 20\%$ до $THD = 3\%$. Застосування АФГ для подавлення ВГ однозначно необхідне у разі

їхнього високого рівня – $THD > 50\%$.

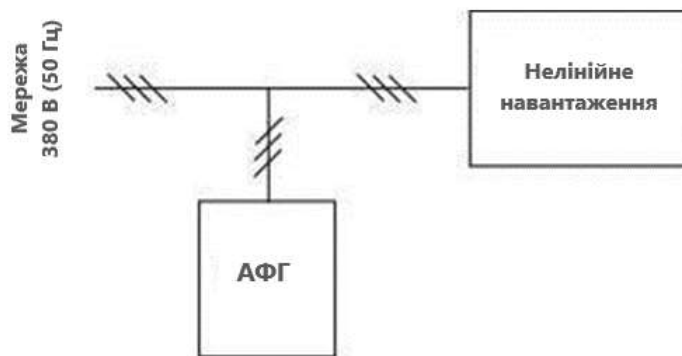


Рисунок 3.6 – Схема приєднання АФГ.

Таким чином, застосування пристроїв подавлення $ВГ$ у розподільних мережах 10 кВ є необхідне й доцільне, але, враховуючи значні фінансові витрати, вимагає здійснення техніко-економічного аналізу та проведення розрахунків.

Застосування силових гібридних фільтрів (СГФ). Як було досліджено в другому розділі пояснювальної записки, $ВГ$ за напругою негативно впливають на багато $ЕП$. Це призводить до втрат у розподільних лініях середніх напруг та силових трансформаторах, зменшенню терміну служби ізоляції, підвищенні небезпеки появи резонансу в ланках мережі з $КБ$ та виходу їх з ладу, а генерація в мережу $ВГ$ викликає погіршення $ПЯЕЕ$: відхилення напруги та несинусоїдальності напруги [4].

$СГФ$ можуть виконувати фільтрацією гармонік вищого порядку з генерацією в енергосистему реактивну потужність, тому їх допускається під'єднувати до робочої енергосистеми при вже реалізованих інших способах зниження $ВГ$, завдяки чому вони дуже поширені у розподільних мережах середньої напруги. $СГФ$ змінного струму шунтують струми $ВГ$ струму або напруги у протифазі з відповідними гармоніками та поділяються на 2 групи:

- група « LC -фільтри» – призначені для фільтрації $ВГ$ та $КРП$.
- група «силові фільтри» – активні та гібридні з додатковим джерелом

енергії для отримання сигналу у вигляді струму або напруги.

При включенні в мережу активного фільтра паралельно до навантаження він виконує роль джерела струму, який вводиться в мережу протифазі зі струмом вищих гармонік. Саме тоді виконується компенсація потужності спотворення, одержуваної вищими гармоніками від нелінійного навантаження.

Структурно гібридні фільтри випускаються в різному виконанні, ввімкнення яких в мережу (AE) представлені на рисунку 3.7 [17].

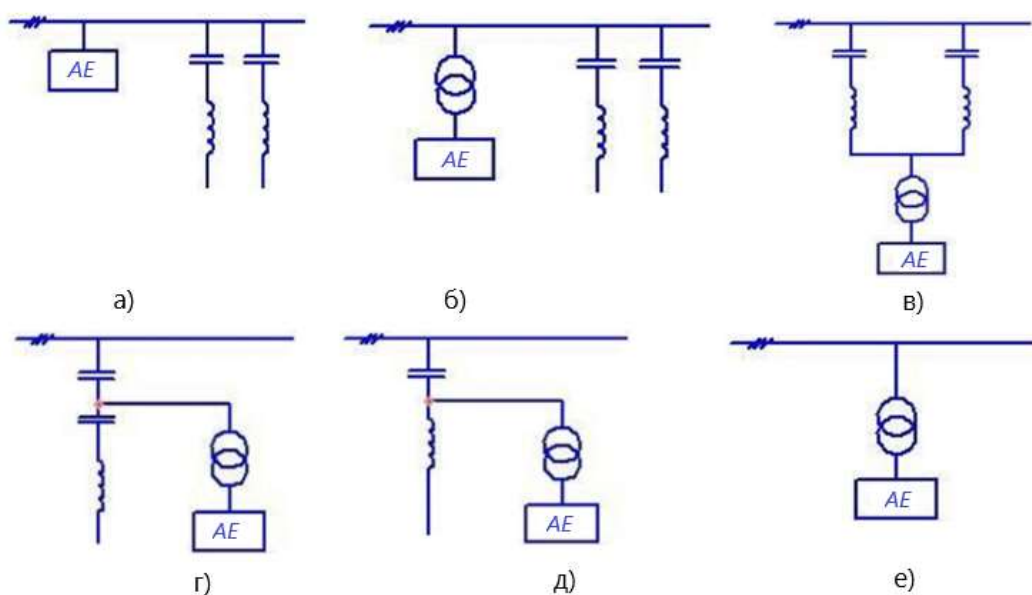


Рисунок 3.7 – Виконання $СГФ$:

а – із ввімкненням активної частини послідовно в мережу; б – з паралельним ввімкненням активних і пасивних елементів в мережу; в – з послідовним ввімкненням активних та пасивних елементів в мережу; г – із ввімкненням типового активного фільтра через ємнісний подільник; д – з ввімкненням типового активного фільтра паралельно реактору резонансного LC -контур; е – виконання типового активного фільтра.

Для порівняння на рисунку 3.7, е показано однолінійна схема ввімкнення типового активного фільтра, потужність якого повинна бути закладена на придушення всього спектру $ВГ$ струму або напруги, у той час, коли в гібридних фільтрах (рис. 3.7, а, б, в) основні гармоніки (5-та та 7-ма) компенсуються в LC -контурі пасивного елемента, причому, активна частина може бути

розрахована на придушення неканонічних гармонік і гармонік більш високих порядків [17].

Приклади функціональних схем *СГФ* представлені на рис. 3.8–3.11 [4, 5].

На рис. 3.8 подана схема *СГФ* з паралельно ввімкненим *LC*-фільтром у трифазній мережі з заданими характеристиками на п'яту та сьому гармоніки.

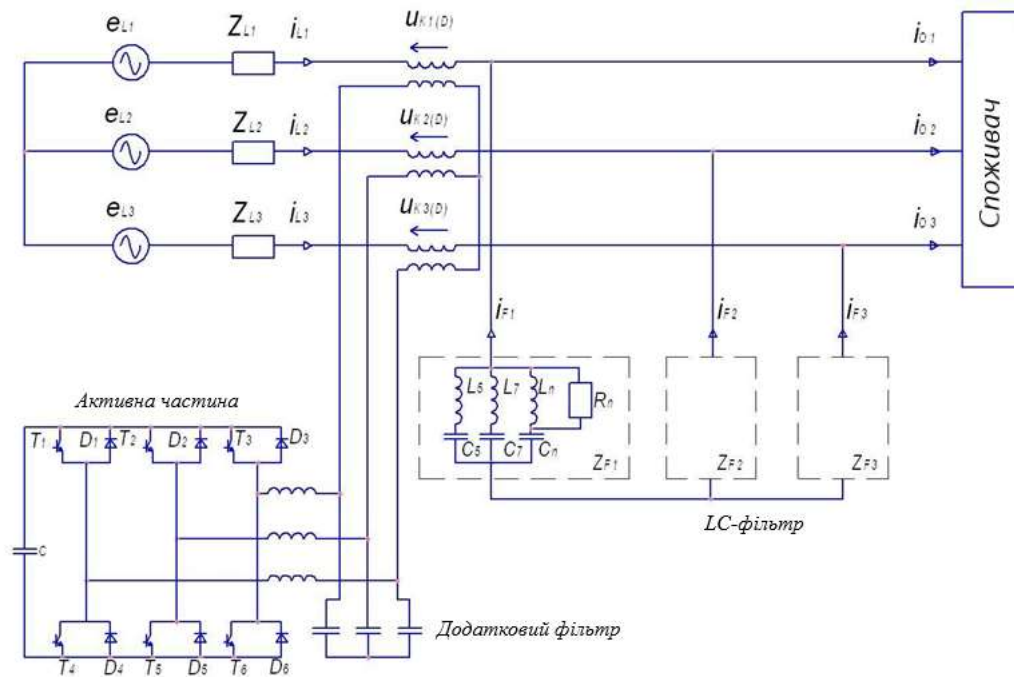


Рисунок 3.8 – Схема *СГФ* з паралельно ввімкненим *LC*-фільтром у трифазній мережі.

LC-фільтр трьох фаз (Z_{F1} , Z_{F2} , Z_{F3}) ввімкнені на групу «зірка», а активна частина виконана на основі керованого інвертора ввімкненого паралельно до навантаження через первинні обмотки трансформаторів (давачі струму D), де конденсатор (C) виконує функцію джерела напруги. Додаткові *LC*-фільтри невеликої потужності на виході інвертора встановлені для зниження перепадів напруги [4, 5].

У схемі *СГФ* на рис. 3.9 активна частина також виконана за схемою інвертора напруги, а вхідні трансформатори з'єднані послідовно з *LC*-фільтрами

пасивної частини. Ступінь фільтрації $B\Gamma$ залежить від відхилення напруги U_L та не залежить від зміни струму навантаження i_0 [4, 5].

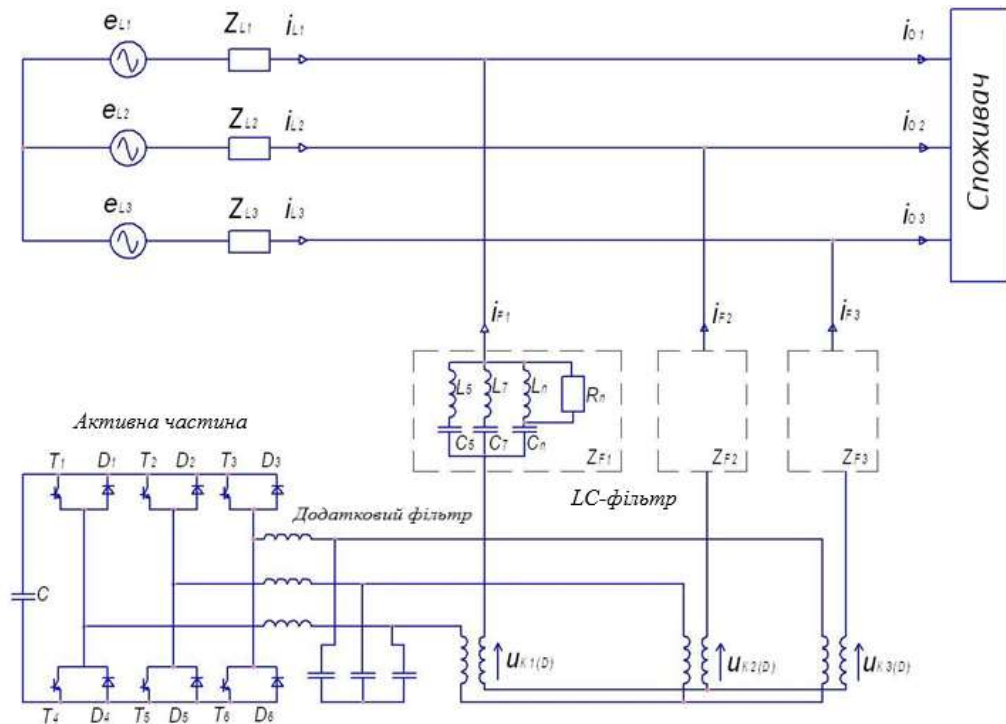


Рисунок 3.9 – Схема $СГ\Phi$ з послідовно ввімкненим LC -фільтром у трифазній мережі.

На рис. 3.10 зображена схема $СГ\Phi$, аналогічного $СГ\Phi$ на рисунку 3.9, але з можливістю не тільки прибирати $B\Gamma$, а й знижувати реактивну потужність. Порівняно з двома схемами, які наведеними вище (рис. 2.8 та 2.9), активною частиною є інвертор струму, а сигналом керування – струм $I_F(D)$ [4, 5].

Схема $СГ\Phi$ на рис. 3.11 має схожі значення представленому $СГ\Phi$ на рис. 3.10, з різницею в тому, що в цьому випадку пасивна частина складається з LC -ланки, яка виставлена на одну вищу гармоніку, як правило, найпотужнішу – 5-ту. Замість додаткового фільтра встановлений RC -обмежувач перенапруги, так як активна частина практично є джерелом струму [4, 5].

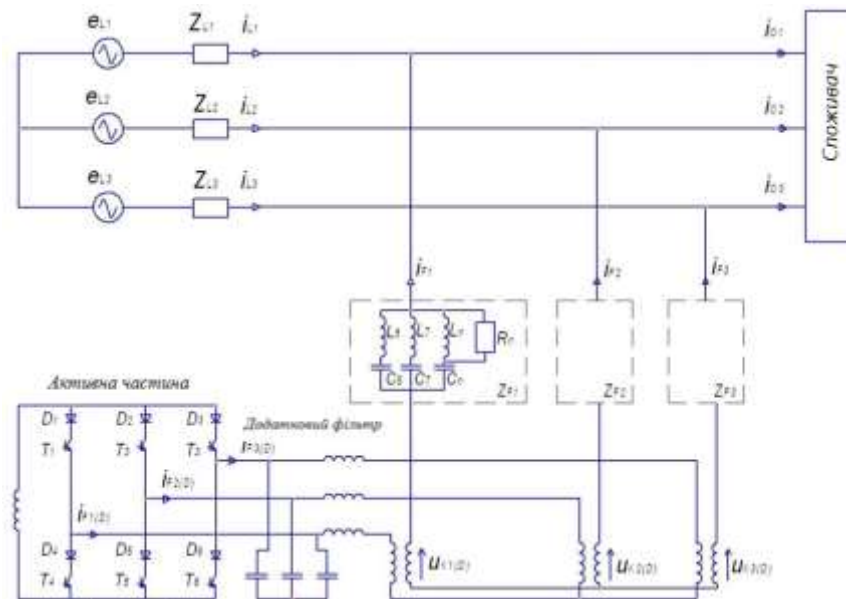


Рисунок 3.10 – Схема $СГ\Phi$ з інвертором струму в активній частині в трифазній мережі.

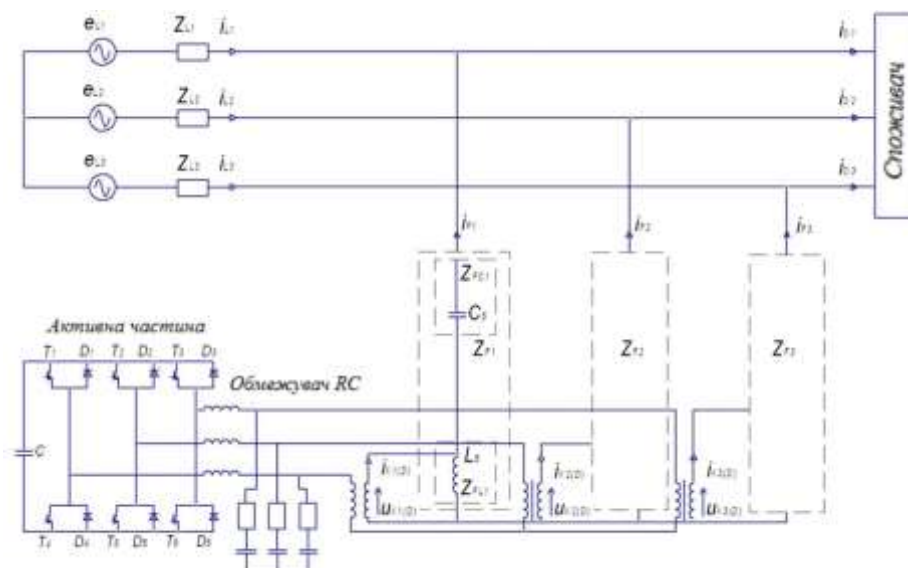


Рисунок 3.11 – Схема $СГ\Phi$ з LC -ланкою та RC -обмежувачем у пасивній частині трифазній мережі.

На рисунку 3.12 наведено графік порівняння змісту $BГ$ розподільчої мережі 10 кВ при застосуванні проаналізованих схем фільтрів.

З графіка (рис. 3.12) зрозуміло, що придатними для зниження впливу $BГ$ у розподільчій мережі 10 кВ слід вважати системи з запасними джерелами

струму, особливо схема, приведена на рис. 3.10. Системи з додатковим джерелом напруги (рис. 3.8 та рис. 3.9) теж мають однакові фільтруючі властивості, хоча трохи нижче систем із додатковим джерелом струму (рис. 3.10 та рис. 3.11). Хоча, слід зауважити, що схеми гібридних фільтрів на рис. 3.10 та рис. 3.11 вигідніші, ніж пасивні LC -фільтри.

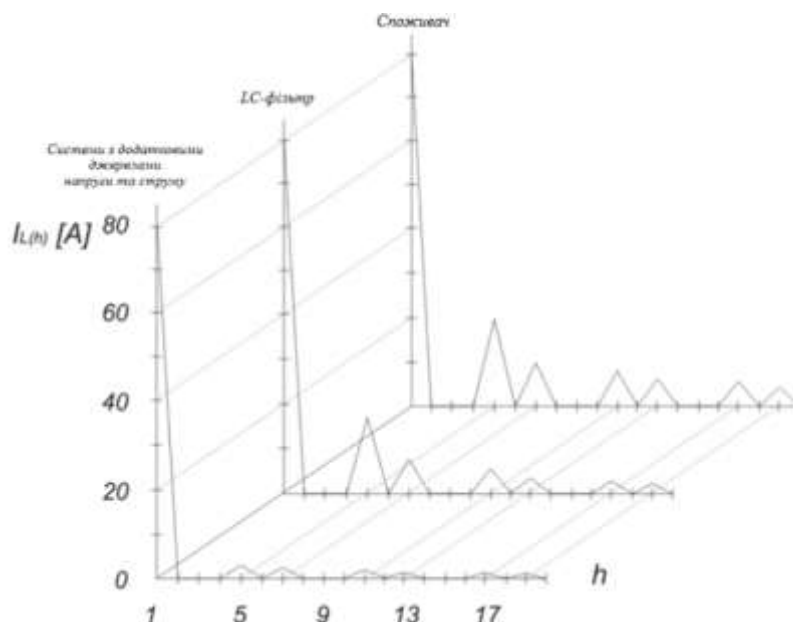


Рисунок 3.12 – Графік порівняння змісту $ВГ$ в електричній мережі.

Активна складова має відмінність високою складністю алгоритмів керування та високими економічними затратами. Описані для різних схем виконання побудови фільтрів недоліки, можливо виправити у фільтрі, представленому на рисунку 3.13 в виді однолінійної схеми [18]. Фільтр виконаний як комбінований, що включає основні елементи $СГФ$ з послідовним ввімкненням в мережу активних та пасивних елементів (рис. 3.7, в) та фільтрокомпенсуючий пристрій, що складається з n -резонансних контурів і послідовно підключеним каналом активної фільтрації.

Компенсація $ВГ$ комбінованим фільтром відбувається завдяки наступним діям: при протіканні струму ν -ої гармоніки $i(\nu)$ ($\nu=1,2,\dots,n$) по елементам резонансного контуру, на елементі активного опору $r(\nu)$ виникає напруга $U_{AE} = i(\nu) \cdot r(\nu)$ (рис. 3.13) [18].

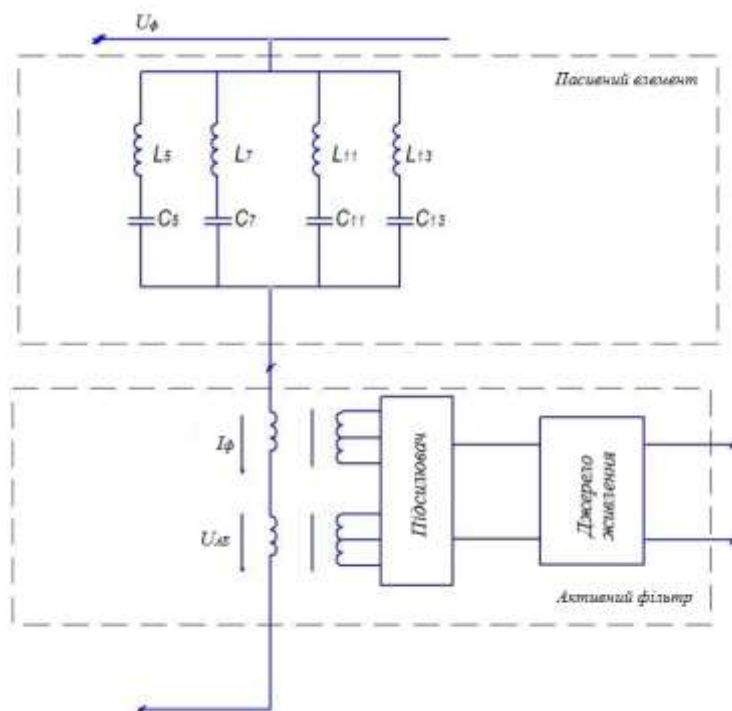


Рисунок 3.13 – Однолінійна схема комбінованого фільтра.

3.2 Висновки до третього розділу

Проведені дослідження використання схемо технічних рішень щодо *КРП* в мережах зі споживачами з нелінійним навантаженням показали вагомий недолік гібридних та активних фільтрів. Для фільтрації гармонік вищих порядків ніж скомпенсовані, необхідно застосовувати *RC*-фільтри та згладжувальні реактори.

Натомість, гібридні фільтри у порівнянні з пасивними *LC*-фільтрами демонструють зниження характеристик струмів найвищих гармонік в електричній мережі в 10 разів, а комбінований фільтр знижує коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги в 3 рази в порівнянні з *ФКП* при тому, що потужність активного елемента фільтра незначна.

Виходячи з вищезначеного, використання нового класу *СГФ* дозволяє покращити *ЕМС* електричного обладнання в розподільних мережах середньої напруги.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи з охорони праці при обслуговуванні електричних установок на підстанції

А) Підвищення експлуатаційної надійності електричного обладнання.

Обладнання розподільних пристроїв експлуатується у відповідності до інструкцій на підприємстві, правил *ПТЕ*, *ПУЕ*, та *ПТБ*, правил пожежної безпеки [19].

Дані планових, поточних і капітальних ремонтів вносяться в експлуатаційну документацію.

Трансформаторні підстанції 110/10 кВ проектується як комплектний розподільний пристрій зовнішньої встановлення (*КРПЗ*). З шаф *КРПЗ* збирають розподільні пристрої (*РП*) 10 кВ. У шафах встановлюють високовольні вимикачі з ручним та/або механічним керуванням. Обладнання комплектної трансформаторної підстанції (*КТП*) розміщують в металевому кожусі.

Основні завдання при експлуатації *РП*: забезпечення відповідності режимів роботи *РП* та окремих ланцюгів технічним характеристикам обладнання; нагляд і догляд за обладнанням; усунення в найкоротший термін несправностей, які призводять до аварії; своєчасне проведення профілактичних випробувань і ремонтів електроустаткування [19].

Б) Організаційні та технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт.

Якщо роботи проводяться без зняття напруги поблизу струмопровідних частин, що знаходяться під напругою, виконуються заходи, що перешкоджають наближенню працівників до цих струмопровідних частин: безпечне розташування працівників по відношенню до струмопровідних частин; організація безперервного нагляду за працівниками; застосування основних і додаткових захисних засобів.

При роботах з частковим або повним зняттям напруги повинні бути виконані у зазначеній нижче послідовності наступні технічні заходи [19]:

- виконання необхідних відключень та вжиття заходів, що перешкоджають подачі напруги внаслідок помилкового чи самовільного ввімкнення комутаційного обладнання;

- вивішування плакатів: «Не вмикати – працюють люди» та при необхідності – встановлення огорожень;

- встановлення заземлень (безпосередньо після перевірки відсутності напруги), тобто ввімкнення ножів заземлення або встановлення там, де вони відсутні, накладання переносних заземлень;

- огороження робочого місця та вивішування плакатів: «Стій – висока напруга», «Працювати тут».

В) Експлуатація електрообладнання розподільних пристроїв. Одна з основних задач експлуатації *РП* – підтримання необхідної пропускну здатності, динамічної, термічної стійкості та за рівнем напруги в цілому та на окремих його елементах. Періодичність огляду встановлюють залежно від типу пристрою, його призначення та форми обслуговування.

Про несправності при оглядах *РП*, проводиться запис в експлуатаційному журналі. Справність резервних елементів *РП* (трансформаторів, вимикачів, шин, тощо) необхідно в відповідності з інструкціями [19] перевіряти, вмикаючи їх під напругу. Резервне обладнання повинно бути в будь-який момент готове до ввімкнення без попередньої підготовки. Періодичність обслуговування *РП* залежить від місцевих умов і встановлюється головним інженером підприємства.

Обслуговування вимикачів. Зовнішні огляди масляних вимикачів без відключення проводяться з урахуванням місцевих умов, але не рідше 1 разу на шість місяців, разом з оглядами *РП*. При оглядах перевіряють: стан ізоляторів, кріплень і контактів на шинах; рівень масла та стан масло вказівників; відсутність протікання масла з розеткових контактів мало об'ємних або через прокладки бакових вимикачів.

При зовнішньому огляді повітряних вимикачів звертають увагу на його загальний стан, на цілісність ізоляторів дугогасильних камер, відокремлювачів, опорів шунтування та ємнісних дільників напруги, опорних колонок і ізолюючих розтяжок, а також на відсутність забруднення поверхні ізоляторів [19].

Обслуговування комплектних розподільчих пристроїв. Для захисту персоналу від випадкового дотику до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою, в *КРП* передбачено блокування. У стаціонарних *КРП* блокують сітчасті двері, які відкривають тільки після відімкнення вимикача та роз'єднувачів. Огляди *КРП* без відімкнення здійснюють за графіком, але не рідше 1 разу на місяць. При оглядах перевіряють роботу мережі освітлення та опалення приміщень і шаф *КРП*; стан вимикачів, приводів, роз'єднувачів, механізмів блокування; забрудненість та відсутність видимих пошкоджень ізоляторів; стан ланцюгів вторинної комутації; дію кнопок управління вимикачами.

При оглядах комплектних розподільчих пристроїв *КРП* та *КРПЗ* необхідно звертати увагу на: стан ущільнень у місцях стиків елементів металоконструкцій; справність приєднання обладнання до контуру заземлення; наявність засобів безпеки та пожежогасіння; роботу та справність пристроїв обігріву шаф *КРПЗ*; стан монтажних з'єднань; справність сигналізації, освітлення та вентиляції [19].

Г) Обслуговування підстанцій. Надійність роботи підстанцій багато в чому залежить від правильності експлуатації, яку необхідно здійснювати у відповідності з існуючими керівними та інструктивними матеріалами. Експлуатаційно-профілактичні роботи трансформаторної підстанції (*ТП*) проводять з метою попередження та усунення можливих при експлуатації пошкоджень і дефектів. В обсяг цих робіт входять систематичні огляди, профілактичні вимірювання та перевірки. Планові огляди *ТП* виконують у денний час за затвердженим графіком, але не рідше 1 разу на шість місяців. Після аварійних відключень живильних ліній, при перевантаженнях обладнання, різкій зміні погоди (мокрый сніг, ожеледь, т.п.) проводять позачергові огляди.

Не рідше 1 разу на рік інженерно-технічний персонал виконує контрольні огляди *ТП*. Зазвичай їх поєднують з прийманням об'єктів до роботи в зимових умовах, з оглядами *ПЛ* – 10 кВ, 0,4 кВ і т. д. Для підтримки *ТП* в технічно справному стані здійснюють планово-попереджувальні ремонти, які дозволяють забезпечити тривалу, надійну та економну їх роботу [19].

4.2 Заходи щодо підвищення стійкості підстанції від впливу електромагнітного імпульсу

Електромагнітний імпульс (*ЕМІ*) впливає насамперед на радіоелектронну й електронну апаратуру. В провідниках індукуються високі напруги і струми, які можуть призвести до постійних або тимчасових пошкоджень ізоляції кабелів, відключення реле, пошкодження елементів зв'язку, систем передачі даних, тощо. Найбільш уразливими елементами обладнання є напівпровідникові прилади, інтегруючі ланки, пристрої керування. [20].

Особливо чутливими до впливу *ЕМІ* є 6 основних груп об'єктів (систем) [20]:

- передачі електроенергії: повітряні *ЛЕП*, кабельні лінії, різні види з'єднувальних ліній і повітряна електропроводка;
- виробництва, перетворення та накопичення енергії: електростанції, генератори постійного та змінного струму, трансформатори, перетворювачі струмів і напруг, комутатори та розподільні пристрої, електричні батареї та акумулятори, паливні, сонячні й термоелементи;
- регулювання та керування: електромеханічні й електронні давачі та інші елементи автоматики, комп'ютерні установки, мікропроцесори;
- споживання електроенергії: електродвигуни та електромагнітні, нагрівальні, холодильні, вентиляційні, освітлювальні установки та кондиціонери;

- електротяги: електроприводи, напівпровідникові та інші типи перетворювачів;

- радіозв'язку, передачі, зберігання та накопичення інформації: антени, хвилеводи, коаксіальні кабелі, електронні прилади, радіопередавачі, радіоприймачі, установки автономного електропостачання, змішувачі, телефонні апарати, телеграфні установки, заземлені кабелі й проводи, АТС.

Найбільш стійкі до *ЕМІ* є вакуумні електронні прилади, які виходять із ладу при енергії 1 Дж. Величина енергії *ЕМІ* залежить від ширини періоду частот антенних систем.

При розробці інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення стійкості електротехнічних і електронних систем, мають бути застосовані способи боротьби з наслідками впливу *ЕМІ* або захист від проникнення імпульсів – не допустити наведені струми до чутливих вузлів і елементів устаткування [20].

Сучасний рівень знань про природу та властивості *ЕМІ* дає можливість розробити та впровадити захист від нього, до яких входять схеми стійкі до електромагнітної інтерференції, радіоелектронні елементи, екранування окремих пристроїв або цілих електронних систем.

Найбільш простим способом захисту є укладання обладнання повністю або окремих вузлів у захисні струмопровідні заземлені екрани та встановлення спеціальних захисних пристроїв на всіх лініях, трубопроводах, отворах і вікнах, які з'єднують внутрішні приміщення з обладнанням та зовнішнім середовищем. Ефективним буде заземлення окремих монтажних контурів (незалежно від заземлення екранів), застосування скручених пар проводів, провідних зв'язків усередині обладнання за деревовидною схемою [20].

Для захисту провідних ліній або антен доцільно послідовно з грозовим розрядником встановлювати полосові фільтри.

Для захисту силового кабелю на вході в обладнання можна застосувати надшвидкодіючі варистори-резистори, які змінюють свій опір в залежності від напруги.

Для обладнання, що живиться постійним струмом, для захисту від *ЕМІ* можна встановлювати додаткові радіочастотні дросельні котушки та пристрої, що придушують коливні перехідні процеси.

Антени захищати від *ЕМІ* можливо за допомогою надшвидкодіючих газорозрядних ламп. Вони витримують у режимі передачі потужність до 100 Вт та захищають від *ЕМІ* [20].

Мікрофони, зовнішні репродуктори та інше периферійне обладнання, а також лінії, що ведуть до них, можна захищати за допомогою фільтрів нижніх частот і швидкодіючих варисторів.

Оцінюючи стійкість роботи та проведення заходів підвищення стійкості роботи мережі електропостачання, оповіщення, *ІПК* та іншого важливого устаткування в умовах надзвичайних ситуацій керівникам і спеціалістам необхідно враховувати можливе ураження від *ЕМІ* та захист від нього [20].

Районні знижувальні підстанції, диспетчерські пункти енергосистем і лінії електропередачі слід розміщувати за межами зон можливих сильних руйнувань.

Постачання електроенергією великих міст і об'єктів, які не припиняють роботу у військовий час, необхідно передбачати від двох незалежних джерел живлення. При електропостачанні об'єкту від одного джерела повинно забезпечити не менше двох введів з різних ланцюгів [20].

Трансформаторні підстанції необхідно надійно захищати, їх стійкість повинна бути не нижчою за стійкість самого об'єкту. Електричну енергію до ділянок виробництва слід подавати незалежними електричними кабелями, які прокладені в землі на глибині 0,8...1,2 м.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати пересувні електростанції на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не під'єднані до енергосистеми [20].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на основі проведеного аналізу та досліджень щодо зниження впливу нелінійного навантаження в електричних мережах 10 кВ встановлено наступне:

1. Аналіз показав, що ефективність компенсації лише за рахунок застосування *БВП* висока, що дозволяє у багатьох випадках суттєво знизити спотворення від потужних перетворювачів як на ланках 10 кВ так і в ланцюгах.

2. Встановлено, що в реальних електричних мережах ступені компенсації дещо відрізняються від розрахункових, що обумовлено відмінністю параметрів електроустановок від ідеальних, а також різноманітністю режимів їхньої роботи.

3. Дослідження особливостей *КРП* споживачів з нелінійним навантаженням показали, що для ефективного вибору заходів зниження *ВГ* необхідно проводити аналіз можливої форми проходження перехідного процесу.

4. Дослідженням встановлено, що застосування пристроїв для *КРП* та придушення *ВГ* у розподільних мережах середньої напруги необхідне.

5. Досліджено, що пристрої поперечної компенсації знижують втрати за напругою в вузлах споживачів, завдяки зниженню навантаження реактивної потужності за навантаженням та на лініях. Для цього пропонується використовувати щоглові конденсаторні установки.

6. Проведені дослідження використання схемо технічних рішень щодо *КРП* в мережах зі споживачами з нелінійним навантаженням показали вагомий недолік гібридних та активних фільтрів. Для фільтрації гармонік вищих порядків ніж скомпенсовані, необхідно застосовувати *РС*-фільтри та згладжувальні реактори.

7. Гібридні фільтри в співставленні з пасивними *LC*-фільтрами показують зниження характеристик струмів найвищих гармонік в електричній мережі в декілька, а комбінований фільтр знижує коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги в 3 рази в порівнянні з *ФКП* при тому, що потужність

активного елемента фільтра незначна.

8. Використання нового класу *СГФ* дозволяє покращити *ЕМС* електричного обладнання в розподільних мережах середньої напруги.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Денисюк С.П. Системи гарантованого електропостачання та питання економії електроенергії / С.П. Денисюк. – К.: Семінар «Синапс / НБУ - 2004». – 2004. – 21 с.
2. Попов В. А., Ткаченко В. В., Ярмолук О. С. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією: навчальний посібник / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 163 с.
3. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
4. Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії / С.П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – Київ: ІЕД НАНУ, – 1999. – С. 46 – 59.
5. Демов О. Д. Оптимізація процесу впровадження компенсувальних установок в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній: монографія / О. Д. Демов. – Вінниця: ВНТУ. – 2016. – 98 с.
6. Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2018.
7. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
8. Zhuikov, V. Y. Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження / V. Y. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, O. F. Bondarenko / Електроніка та зв'язок. – 2017. - № 22 (4). – С. 30-37. – doi: 10.20535/2312- 1807.2017.22.4.105271.
9. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії.

Наказ Міністерства палива та енергетики України від 17 січня 2002 року № 19. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за № 93/6381.

10. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 45 с.

11. Черкашин В.П. Дослідження впливу несиметричного навантаження на режим системи електропостачання / В.П.Черкашин // Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст» (84-я студентська науково-технічна конференція ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) 23-25 квітня 2019 р. – Ч.2. – С. 23-25.

12. Попова І. О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.16 "Електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі" / І. О. Попова. – Мелітополь, 2003. – 20 с.

13. Закладний О. М. Захист як складник системи функціонального діагностування асинхронних електродвигунів / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний // Промелектро. – 2010. – № 4. – С.36- 40.

14. F. Z. Peng, G. Ott and D. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 6, p. 1174–1181, November 1998.

15. H. Akagi, "Modern Active Filters and Traditional Passive Filters," Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences, no. 54, p. 255–269, 2006.

16. J. H. Kim and S. K. Sul, "A carrier-based PWM method for three phase forelegs voltage source con-venters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 1, p. 66–75, January 2004.

17. Strzelecki R., Supronowicz H., Wspottczennik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego I metody jego poprawy, Warszawa, 2012. 452 p.

18. Коваль В.П., Тарасенко М.Г., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого

рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.

19. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258] / М-во палива та енергетики України. – Х. : Індустрія : Енергетичні рішення, 2012. — 318 с.

20. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.