

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**Шепель Сергій Михайлович**

УДК 621.359.4

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Аналіз компенсації впливу нелінійного навантаження споживачів на  
розподільчу мережу 6-10 кВ  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Шепель С. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Фомін Миколаа Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри прикладної та  
вищої математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Шепель С. М. Аналіз компенсації впливу нелінійного навантаження споживачів на розподільчу мережу 6-10 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Метою роботи є зниження втрат активною потужності, забезпечення вимог ДСТУ по підтримці показників якості електричної енергії і збільшення пропускної здібності ЛЕП - 6-10 кВ.

Предмет дослідження - методи і засоби зниження впливу на розподільчу мережу 6-10 кВ споживачів з нелінійною навантаженням.

**Ключові слова:** релейний захист, втрати активної потужності, якість електроенергії, ефективність.

## ABSTRACT

Shepel S. M. Analysis of compensation for the impact of non-linear consumer load on the 6-10 kV distribution network. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The purpose of the work is to reduce losses of active power, to meet the requirements of DSTU for maintaining the indicators of the quality of electric energy and to increase the transmission capacity of power lines - 6-10 kV.

The subject of the study is methods and means of reducing the impact on the 6-10 kV distribution network of consumers with non-linear loads.

**Key words:** relay protection, active power losses, power quality, efficiency.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ТА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	7
1.1 Аналіз кількості сучасних нелінійних електроприймачів.	7
1.2. Характеристики нелінійних споживачів	10
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВПЛИВУ НА РОЗПОДІЛЬЧУ МЕРЕЖА 6-10кВ СПОЖИВАЧІВ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	19
2.1. Аналіз ефективності доцільності підвищення фазності перетворення електричної енергії	19
2.2 Закономірності фазних струмів багатофазних вентильних перетворювачів (БВП)	22
2.3 Розрахунок встановленої потужності трансформаторного обладнання БВП	24
Висновки по розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОФАЗОВИХ ВЕНТИЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	29
3.1 Ефективність використання БВП для забезпечення якості електроенергії	29
3.2 Компенсація ВГ у 36-фазній схемі перетворення	38
3.3 Компенсація ВГ в 48-фазній схемі перетворення	41
Висновки по розділу 3	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

## ВСТУП

Останнім часом збільшилося навантаження на житловий та адміністративно- побутовий фонд. Техніко-економічна ефективність сучасних систем електропостачання непромислових споживачів в значній мірі визначається рівнем практичного рішення комплексу таких завдань, як зниження невиробничих втрат електроенергії та компенсація впливу нелінійних споживачів на розподільчу мережу; регулювання напруги і забезпечення електромагнітної сумісності.

Крім вимог електромагнітної сумісності (ЕМС)[17] в зв'язку з виходом Постанови Кабінету Міністрів України № 1077 від 16.12.2015р. про включенні електричної енергії в список товарів, підлягають обов'язковою сертифікації, якість електроенергії повинно дотримуватися так ж з точки зору Закону України «Про захист прав споживачів».

Для забезпечення належних техніко-економічних показників функціонування систем електропостачання, необхідно підтримка показників якості електричної енергії на рівні Постанови № 375 12.06.2018 [18].

Незважаючи на значні успіхи, досягнуті в результаті численних досліджень, виконуваних в останні роки в широких масштабах, гострота проблеми ЕМС в системі електропостачання непромислових споживачів не послаблюється, а навпаки, набуває глобальний характер. Основний причиною тому є дві категорії об'єктивних факторів, супутніх сучасному етапу розвитку непромислової електроенергетики та електротехнологій. З одного боку, вже довго в системі електропостачання непромислових споживачів зберігається стійка тенденція прогресуючого зростання числа та потужності енергоємних нелінійних, несиметричних та різко змінних споживачів електроенергії.

До таким споживачам відносяться житлові, адміністративно-побутові будівлі і інші різні будівлі. Перелічені вище споживачі погіршують цілий

ряд показників якості електроенергії і ускладнюють технічне вирішення проблеми забезпечення ЕМС у системі електропостачання непромислових споживачів, а також в цілому знижують ефективність передачі, розподілу, та споживання електричної енергії.

Актуальність теми. на сьогоднішній день, що з'явилися ринкові відносини між споживачем і виробником електричної енергії, зобов'язують виробника до якісного електропостачання. Але на жаль, нинішнє, використовуване обладнання в Україні застаріло.

**Об'єкт дослідження** - розподільна мережа 6-10 кВ з нелінійною навантаженням.

**Предмет дослідження** - методи і засоби зниження впливу на розподільчу мережа 6-10 кВ споживачів з нелінійною навантаженням.

**Метою роботи** є зниження втрат активною потужності, забезпечення вимог ДСТУ по підтримці показників якості електричної енергії і збільшення пропускної здібності ЛЕП - 6-10 кВ.

Для досягнення цілі роботи поставлені наступні **завдання** :

1. Визначення спектру вищих гармонік струму по результатам вимірювань в розподільчю мережі для наступних характерних типів непромислових споживачів: торговий центр, адміністративно-побутове та житлове будинок.

2. Виконати порівняльний аналіз методів і коштів зниження впливу на розподільчу мережа 6-10 кВ споживачів з нелінійною навантаженням.

3. Розробка технічних методів по компенсації впливу вищих гармонік струму на режими роботи обладнання розподільчю мережі.

4. Оцінка економічного шкоди електромережевий організації, викликаного впливом сучасних електроприймачів споживачів.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Фомін М. П., Шепель С. М. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОЦІЛЬНОСТІ

## ПІДВИЩЕННЯ ФАЗНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Матеріали VII Міжнародна науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» 15-17 листопада 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-49.

## ФОМІН М. П., ШЕПЕЛЬ С. М. ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОФАЗОВИХ ВЕНТИЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інженерні процеси та системи» 14-15 червня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-51.

## ШЕПЕЛЬ С. М. АНАЛІЗ КІЛЬКОСТІ СУЧАСНИХ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2023» 25 жовтня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 72-73.

## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ТА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

#### 1.1 Аналіз кількості сучасних нелінійних електроприймачів.

Нові житлові і адміністративно-господарські фонди насичені великою кількістю електроприймачів. Приблизно їх можна поділити на освітлювальні, силові прилади та побутове обладнання будівель. До 1 групи відноситься обладнання, яке використовується для освітлення квартир, загально-майнових просторів, ліфтів, сходових клітин, холів і т.д. До 2 групі відносяться побутові прилади: телефони, TV обладнання, музичні апарати, посудомийні машини, ноутбуки, кондиціонери, мікрохвильові печі і і т.д. До 3 групі відноситься обладнання, яке використовується для спільного користування житловим. Аналіз зростання використання побутового електрообладнання показано в таблиці 1.1[15].

Таблиця 1.1 – Кількість електроспоживачів з нелінійною характеристикою в житлових і адміністративно-побутових секторах

Найменування електроприладу	Кількість електроприладів, шт. на 100 сімей				
	2010	2012	2014	2015	2017
Телефони	80	95	137	169	197
Ноутбуки	30	36	59	67	75
СВЧ піч	69	77	92	98	100
Кондиціонер	12	15	31	43	56

Модернізація електроприймачів передбачає збільшення коефіцієнта корисного дії (ККД), покращення режимів роботи і зменшення енергоспоживання.

Багато фахівців стверджують, що, коли потужність споживачів з нелінійною характеристикою не перевищує 11-16%, помітних погіршень якості електроенергії не виникає. Якщо потужність починає перевищувати вказані межі, то в розподільчій мережі якість електроенергії погіршується.

На рисунку 1 показано перевищення значень якості електроенергії

прописаних у [18], а саме несинусоїдність кривої напруги у місцях вимірювання та контролю. Це веде до появи 3, 5 та 7-х гармонік напруги. Поява вищих гармонік у мережі позначається на зменшенні терміну служби електроприймачів, збільшення їх відмов, що тягне за собою збільшення електротехнічної та технологічної шкоди, все це згубно відбивається на споживачах, кількість яких рік у рік лише збільшується. Якщо не проводити боротьбу з усуненням чи обмеженням перешкод, то це буде погано позначатися на споживачах розподільчою мережі 380В.

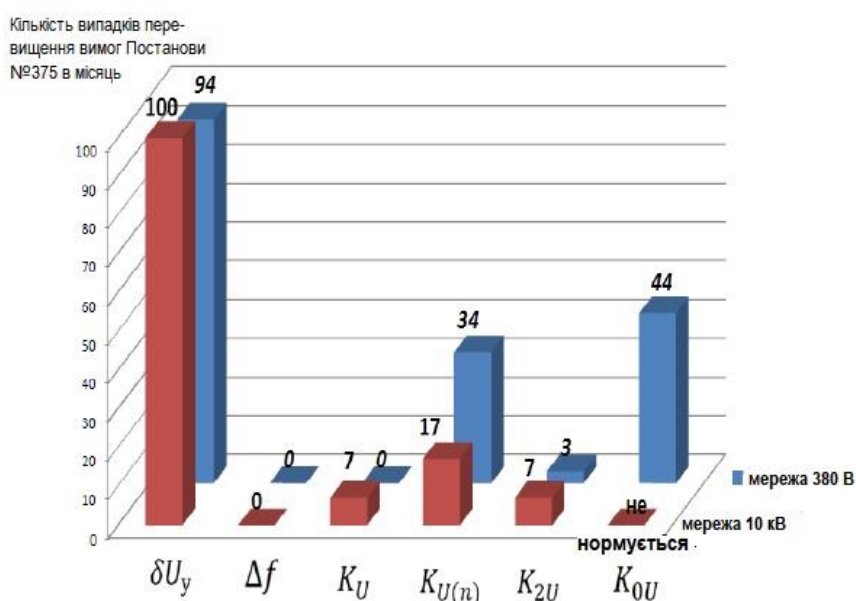


Рисунок 1.1. Кількість випадків перевищення вимог Постанови №375

На зміну звичним ламп розжарювання для спільного освітлення прийшли світлодіодні і компактні люмінесцентні, які мають найкращі технічні характеристики з покращеною світловіддачею при значно меншому електроспоживанні і великим терміном служби. У житловому секторі кардинально змінилися застосовувані і використовувані електроприлади, з'являється нове обладнання, таке як: ноутбуки, мобільні телефони і інші. Далі розглянуті деякі з них.

### 1.1.1 Компактні люмінесцентні лампи.

З кожним роком зростає частка застосування компактних люмінесцентних



ламп для освітлення. Навіть при їх більшій вартості по порівнянні з лампами розжарювання. У люмінесцентних ламп в 5-10 раз більше термін служби та при однаковій яскравості вони споживають електроенергію у 2-4 рази менше. за розрахунками експертів, можна, можливо економити до 40 мільярдів кіловат-годин в рік електроенергії, при заміні всіх старих ламп на енергозберігаючі по всій країні. У деяких випадках економія на освітленні може привести до збільшення електроенергії. Так, наприклад, коли жителям міста Трер в США (населення міста 1700 людина) запропонували безоплатно замінити старі лампи на енергозберігаючі, погодилося приблизно 50% мешканців. Споживання електроенергії зросло на 10% через того, що люди припинили вимикати світло в своїх будинках, сподіваючись на економність нових, світлодіодних ламп.

У лабораторних умовах були зроблено дослідження, які показали, що найбільша кількість енергозберігаючих ламп споживають струм, форма продемонстровано рисунку 1.2 [12].

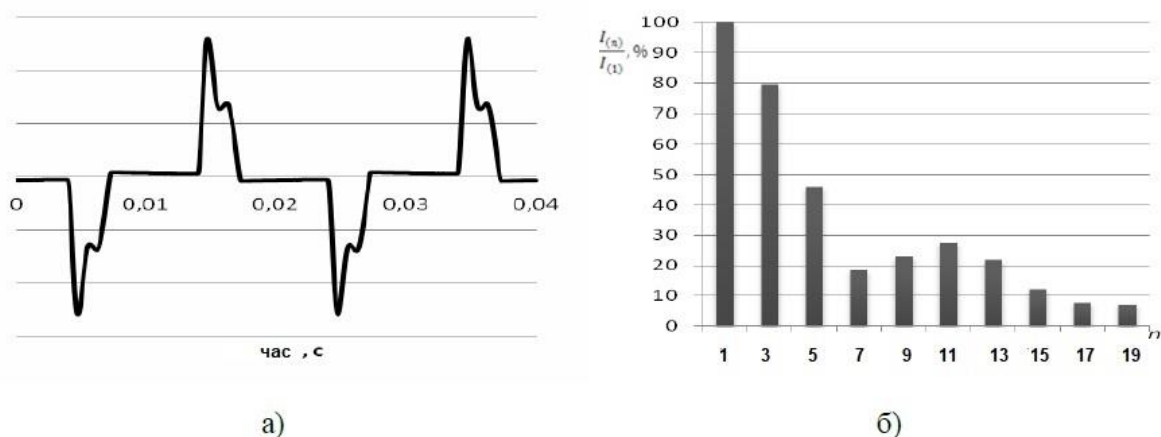


Рисунок 1.2 - Осцилограма (а) і спектр гармонік (б) струму, споживаного світлодіодною лампою

### 1.1.2 Електроустаткування з силовою електронікою

Наступними джерелами вищих гармонік в розподільчих мережах низького напруги є прилади, мають в своєму переліку випрямляч з потужним фільтром (ємнісним). Збільшення середніх втрат у розподільчих мережах, зменшення пропускної спроможності всіх мереж, і, в результаті -

збільшення витрат на передачу електроенергії - Усе ці негативні фактори на мережу виникають внаслідок відсутності установок компенсації нелінійних навантажень. Це пристрої, які мають безтрансформаторний вхід (такі приймачі як: принтери, комп'ютери, LED монітори, TV-обладнання і т.д.). Характерна осцилограма струму для таких електроприймачів та її спектр наведено на рисунку 1.3.

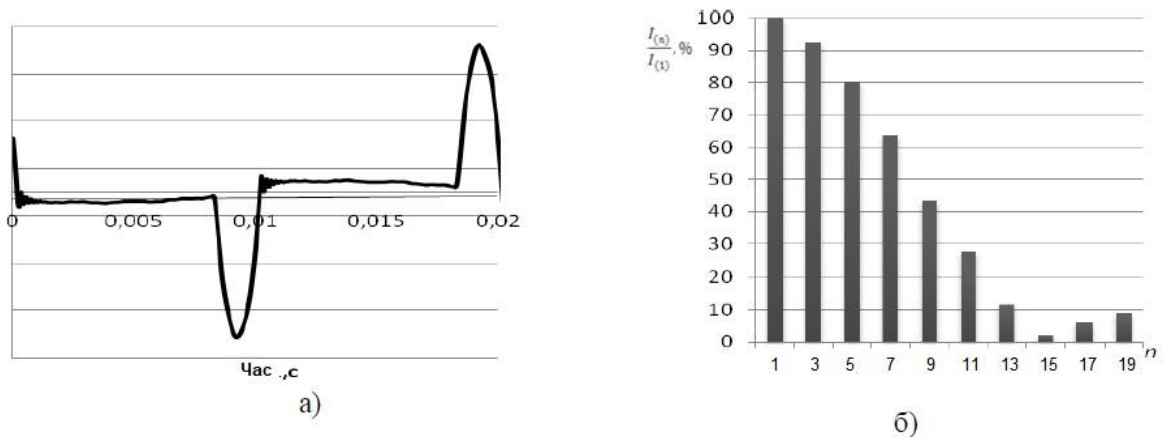


Рисунок 1.3 – Осцилограма (а) і спектр гармонік (б) споживаного монітором

При такому режимі роботи імпульсних джерел живлення, виникає спотворення в живильній мережі джерела. Причому ці ж приймачі дуже чутливі до погіршення якості електроенергії.

## 1.2. Характеристики нелінійних споживачів

### Торговий центр (ТЦ)

У березні 2015 року були проведено виміри на трансформаторний підстанції (ТП) 10/0,4кВ, що живить ТЦ. Виміри проводили на фідерах 380В, в 3-фазних і 1-нульовий жилах живильного кабелю павільйонів з побутовою технікою. Вимірювання проводились безперервно в течія семи діб.

Графік роботи ТЦ – щоденно з 9:00 до 21:00. Бо всі дні тижня робітники, навантаження було постійним. У робочі години навантаження збільшувалося і фіксувалася на одному рівні, у нічний час значно зменшувалася, тижневий графік навантаження представлений на рисунку 1.4.

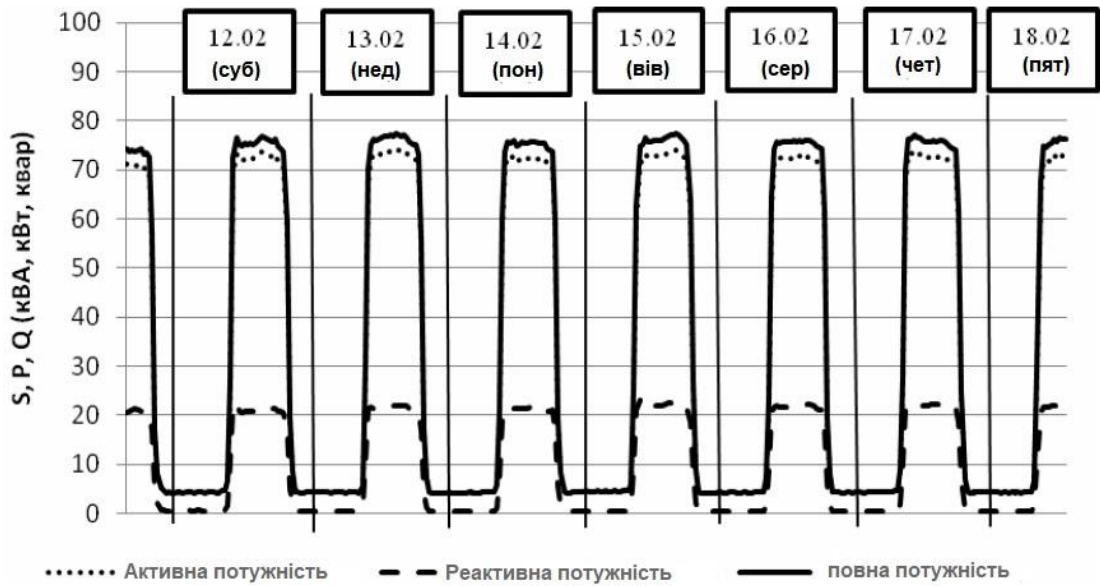
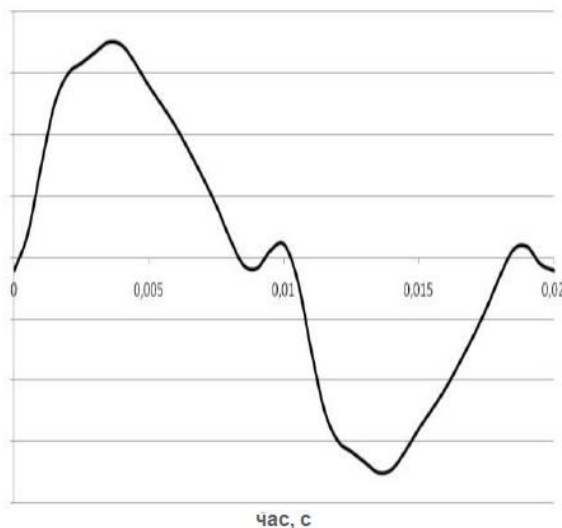
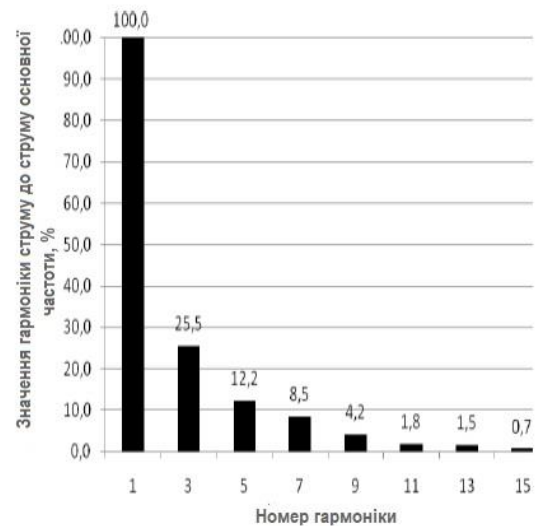


Рисунок 1.4 - Тижневий графік навантаження фідера №1 ТП 10/0,4кВ

У робочі години ТЦ, коли в мережу включені всі електроприймачі з нелінійною навантаженням, споживаний струм має несинусоїдальну форму (рисунок 5а). Середньоквадратичне значення струму 3-ї гармоніки в піку навантаження, середнє на 30-хвилинному інтервалі, становить 23,4% від значення струму основної частоти, 5-ї - 10,5%, 7-ї - 7,8%, 9-ої - 5,5% (рисунок 5 б). Значення гармонік вищого порядку не перевищують 25%.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Осцилограма (а) та спектр гармонік (б) струму у фазній жилі

Таблиця 1.2 – Середні 30-ти хвилинні значення струмів вищих гармонік

максимуму навантаження по фідерам

Номер гармонік	Фідер №1.1 $I(n)$ , %	Фідер №1.2 $I(n)$ , %	Фідер №1.3 $I(n)$ , %	Максимальний значення $I(n)$ В
1	100	100	100	100
3	26,3	29,2	28,1	29,2
5	15,4	15,7	17,6	17,6
7	12,3	13,3	11,8	13,3
9	8,1	7,5	9,2	9,2
11	6,5	6,1	5,1	6,5
13	4,2	2,9	1,9	4,2
15	3,2	2,1	1,6	3,2
17	2,1	1,5	0,9	2,1
19	0,9	0,9	0,8	0,9
21	0,7	0,4	0,5	0,7

У таблиці 1.2 показані середні 30-хвилинні значення струмів вищих гармонік середніх по фаз в максимальний момент навантаження по розглянутим фідерам. Тому для подальшого розгляду, аналізування та оцінювання найбільшого впливу струмів вищих гармонік на працездатність приймачів у розрахунках за вихідну область гармонік приймаємо найбільше значення струмів по всіх вимірених гармоніках по всіх фідерам.

Аналізуючі отримані результати вимірювань, можна побачити, що розподіл півгодинних значень ряду вищих гармонік в періоді максимального навантаження має роль очікуваного математичного зміщення грані максимуму значень, що показано на рисунку 1.6.

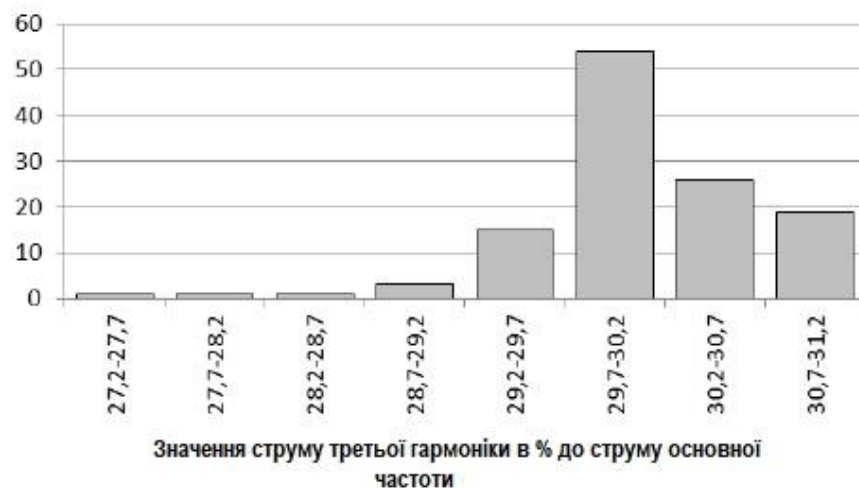


Рисунок 1.6- Гістограма розподілу значень струму третьої гармоніки в відсотках до струму основної частоти

Максимальні значення за певними гармонікам струму в режимі найбільших навантажень мають певний коефіцієнт кореляції повідношенню один до одного.

Збільшення кількості електроспоживачів через розвиток і будівництво нових мікрорайонів, призводить до потреби у спорудженні нових розподільчих підстанцій. При цьому комплектні конденсаторні установки можуть бути розглянуті як альтернатива встановлення нових комплектних трансформаторних підстанцій. Індуктивний струм запізнюється від напруги, а ємнісний випереджає струм.

При електропостачанні споживачів з великим відсотком комп'ютерної техніки в нульовому провіднику по кабелю протікають струми, робоче значення яких рівні значенням струмів в фазі (173А) в фазі і 119Ау нульовому провіднику). На осцилограмі (рисунок 1.7,а) та спектрі гармонік струму (рисунок 1.7,б) у нульовому провіднику. Ще крім гармонік 3-го порядку, в спектрі струму, разом з основною частотою, діє 5-а і 7-а гармоніки, характеризуються не симетрію завантаження фаз.

У період вимірювань показники струму в нульовому провіднику во час роботи ТЦ не змінюється. Вранці в 9 годин і увечері в 20 годин, коли відкривається та закривається ТЦ відповідно, проглядається збільшення показників гармонік струму 5-го та 7-го порядку (рисунок 1.8).

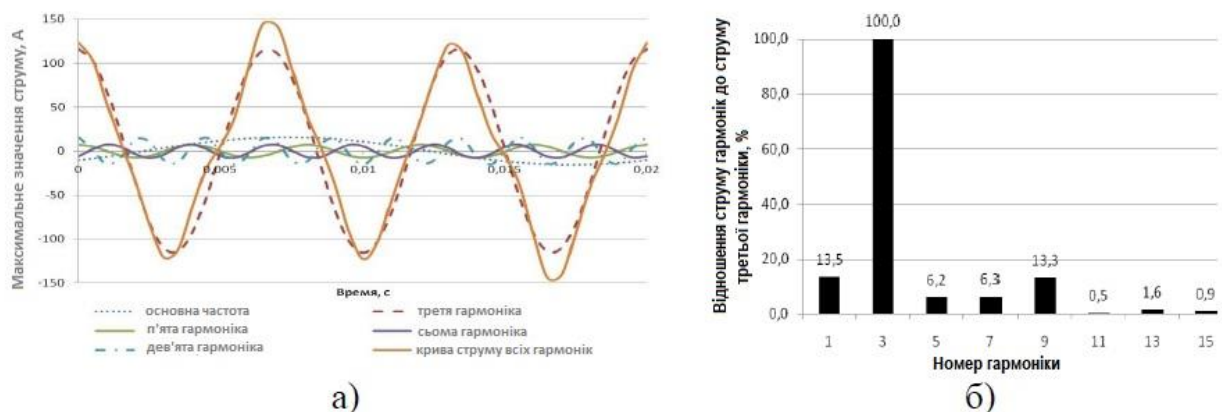


Рисунок 1.7 - Осцилограма (а) і спектр гармонік (б) струму в нульовій жилі

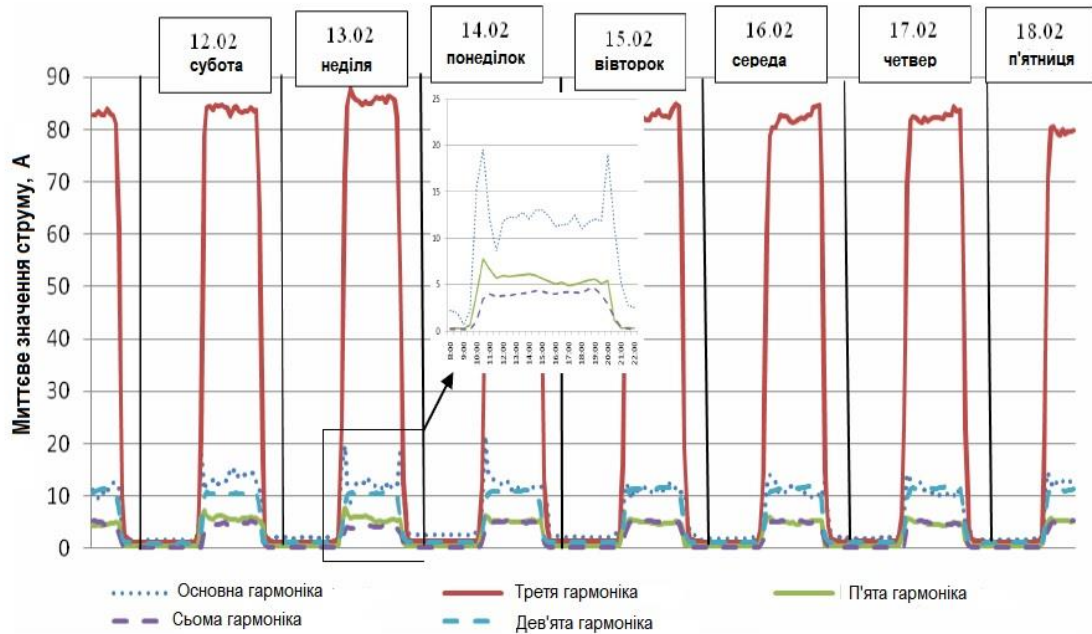


Рисунок 1.8 – Зміна значень, гармонійних складових струму  
нульової жили за тиждень

Таке зростання пов'язане з неодноразовістю відкриття та закриття торгових павільйонів, а, отже, і з рівномірним завантаженням по трьом фазам у період початку та закінчення роботи ТЦ.

### Адміністративно-господарські будівлі

Основними споживачами нелінійного навантаження в адміністративно-господарських будинках є комп'ютерна техніка.

Тижневий графік споживання навантаження адміністративно-господарської будівлі, характеризується періодичністю. Зменшення і збільшення навантаження на розподільчу мережу збігається з початком і завершенням робочого дня.

Заміри проводилися для знаходження спектра вищих гармонік струму, споживаного адміністративно-господарською будівлею в режимі максимального завантаження. У таблиці 1.3 показані отримані 30-хвилинні дані струмів вищих гармонік середніх фаз у максимальний період навантаження для 3-ох різних адміністративно-господарських будівель, які скомплектованими за ідентичним принципом, як і для ТЦ.

Таблиця 1.3 - Значення струмів вищих гармонік як найбільшого

навантаження з фідерів в відсотках від струму основної частоти

№ Гармоніки	Адміністративно-господарська будівля №1.1 $I(n)$ , %	Адміністративно-господарська будівля №1.2 $I(n)$ , %	Адміністративно-господарська будівля №1.3 $I(n)$ , %	Максимальне значення $I(n)$ , %
1	100,0	100,0	100,0	100,0
3	14,2	31,1	24,1	31,1
5	14,1	12,9	14,2	14,2
7	7,2	11,3	7,6	11,3
9	8,1	16,1	9,9	16,1
11	3,1	8,7	5,4	8,7
13	4,2	4,4	7,8	7,8
15	3,4	2,9	4,7	4,7
17	4,6	5,7	2,9	5,7
19	2,6	1,9	1,8	2,6
21	0,8	1,6	0,7	1,6

Гармоніки струму вищого порядку не потрапили в таблицю через те, що їх значення менше 1,0%.

### **Житлові будівлі**

Розгляд непромислових споживачів закінчимо житловими будинками, вони мають достатньо велику частину нелінійних споживачів.

Виміри проводилися на початку листопада 2021 року на розподільчих лініях, від ТП 10/0,4кВ до житлових будинків. Період вимірів склав 14 діб.

Споживання електроенергії відрізняється в різні дні тижня, і приблизно їх можна розділити на дві групи: робочі і вихідні дні тижня. Графік енергоспоживання житлового будинку в робочий день тижня містить два максимальні періоди навантаження: в ранковий час 7-8 годин, коли люди прокидаються і збираються на роботу та у вечірній час з 18 до 23 години, коли люди повертаються з роботи і збираються спати. Як видно ввечері споживання електроенергії більше ніж вранці за кількістю та по тривалості в часовому значенні.

У залежності від числа квартир в будинку, кількості мешканців і від режимів денного розпорядку і робочих годин мешканців, максимум ранкового споживання електроенергії може бути слабо виражено, або зовсім відсутнє, при цьому споживання електроенергії житлового будинку зростає рівномірно

до вечірніх максимальних годин споживання навантаження.

У вихідний день показники навантаження не мають такого вираженого максимуму вранці як у будній день через те, що люди починають свою активність в різні ранкові години, ввечері споживання не таке велике по порівнянні зі середнім споживанням навантаження за весь день і має велику тривалість по часу - з 16 до 23 годин.

У таблиці 1.4 наведено характеристики струмів вищих гармонік в максимальні періоди навантаження за фідерами, що забезпечують житлові будинки, у відсотках від струму основної частоти.

Таблиця 1.4 - Характеристики струмів вищих гармонік у максимальні періоди навантаження з фідерів в відсотках від струму основної частоти

№ гармоніки	Фідер №1.1 $I(n)$ , %	Фідер №1.2 $I(n)$ , %	максимальне значення $I(n)$ в спектрі струму по фідерам, %
1	100	100	100
3	11,4	11,2	11,4
5	5,1	5,9	5,9
7	4,2	5,3	5,3
9	4,5	4,2	4,5
11	2,9	4,3	4,3
13	2,6	2,9	2,9
15	1,2	2,1	2,1

Перевантаження нульового провідника струмами вищих гармонік призводить до неминучого перевищення допустимої температури встановленою заводом виробником кабельної продукції. Це наводить до швидкому старінню ізоляції, і тягне зменшення терміну служби кабелю.

Зменшення пропускної здібності і ризик аварійного вихід з роботи обладнання розподільчої мережі в слідстві впливу струмів вищих гармонік тягне до підвищення ризику виходу з ладу обладнання споживача та перерви його електропостачання. Залежно від величини ймовірної отриманої шкоди та ймовірності настання даного випадку підбираються дії по мінімізуванню і запобіганню його впливу на обладнання.

Кожне обладнання призначений для роботи при номінальних параметрах



електричної мережі: номінальної частоти, струму, напруги та т.п., тому для нормального функціонування обладнання необхідно забезпечувати потрібну якість електричної енергії (ЯЕ).

Електроустаткування розподільчої мережі може бути в різних обставинах по температурному режиму в період року, що завдає різну економічну шкоду від зниження термінів служби електроустаткування. Зарахування отриманої не в повної мірі амортизації електрообладнання на втрати компанії трапляється тільки по випадку його списання при виході його з ладу до запропонованого терміну служби заводом-виробником. Тому, що зменшення терміну служби в керівництві навантаження трансформаторів [13] рекомендується кваліфікувати.

Можна лише міркувати про можливий термін служби, але все ж, для цього потрібно володіти статистикою про вихід з ладу та їх фактори. У електромережах така статистика не ведеться.

Будь-який перегрів за встановленою температурою провокує вихід із ладу будь-який електроустановки. Через це можуть траплятися невеликі перерви електропостачання споживачів. Споживач зі свого боку зазнає втрат, які поділяються на два типи: втрати, пов'язані з позаплановим відключенням живлення та витрати пов'язані з простоем виробництва [15]. Другий тип пов'язаний з постійними витратами, які викликані простоями обладнання і не списуються на собівартість виробництва. Велика частина витрат йде на оплату праці робітників.

### **Висновки по першому розділу**

1. Споживачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою по роздільності і разом створюють великі спотворення в кривій струму. Для непромислових електроспоживачів з сучасним обладнанням показники струму за деякими гармоніками може бути більше 25% від струму основної частоти. При цьому для певних електроприймачів нормативні значення стандарту на електромагнітну сумісність не порушуються.

2. Отримані дані щодо вимірів на лініях, що відходять до фідерів з

нелінійною вольт-амперної характеристикою споживачів вказує на наявність великого змісту вищих гармонік струму у фазних та нульовому провідниках. При подальшому аналізі розрахункового прикладу застосовується спектр вищих гармонік струму по максимальному середньому значенню на півгодинному проміжку значень, отриманих в режимі максимальних навантажень (Таблиця 1.5). Такі дані вищих гармонік струму при оцінюванні їх дії призведе до максимального результату (оцінкою зверху).

Таблиця 5 - Спектр гармонік струму для різних типів споживачів

№ гармоніки	Торговляий центр $I(n)$ , %	Адміністративно-господарська будівля $I(n)$ , %	Житловий будинок $I(n)$ %
1	100	100	100
3	29,2	31,1	11,4
5	17,6	14,2	5,9
7	13,3	11,3	5,3
9	9,2	16,1	4,5
11	6,5	8,7	4,3
13	4,2	7,8	2,9
15	3,2	4,7	2,1
17	2,1	5,7	-
19	0,9	2,6	-
21	0,7	1,6	-

## РОЗДІЛ 2

# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВПЛИВУ НА РОЗПОДІЛЬЧУ МЕРЕЖА 6-10кВ СПОЖИВАЧІВ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

### 2.1. Аналіз ефективності доцільності підвищення фазності перетворення електричної енергії

Відомі багато десятки завершених розробок, практичні результати яких підтверджуються виготовленням та експериментальним дослідженням макетних, лабораторних і дослідно-промислових зразків навіть окремими партіями типових промислових виробів, що забезпечують необхідну ефективність досягнення поставлених цілей. Однак, попри на незаперечні переваги, технічна реалізація масового промислового виробництва багатьох розробок, їх широке практичне застосування особливо в мережах систем електропостачання промислових підприємств (СЕСП) напруги 6 і 10кВ, зустрічає цілий ряд об'єктивних перешкод.

Зокрема, це може бути віднесено до еквівалентних багатофазних вентильних перетворювачам (БВП), до тиристорним регуляторам потужності (ТРМ), до цілому сімейству статичних (тиристорних) компенсаторів реактивної потужності (СТК чи ТКРП) [10].

При нелінійному і швидкозмінному навантаженні (статична нестабільність напруги в основному пов'язана з дисбалансом реактивної потужності), застосування статичних компенсаторів реактивної потужності стає необхідністю, це дуже корисно для підтримки стабільності в системі, що дає можливість регулювати реактивну потужність і покращувати динамічну стійкість. З такими умовами можна відстежити підвищення техніко-економічних показників у роботі мережі, все це відбувається завдяки підвищенню статичної стійкості в енергосистемі.

Статичні компенсатори реактивною потужності (СКРП), які складаються з конденсаторних батарей та реактора, на сьогоднішній день признаються перспективними пристроями для компенсації реактивною потужності. У

результаті чого можна отримати позитивні фактори, такі як швидкодіюче регулювання, зменшення до мінімуму коливань напруги, симетрія більшості навантажень, відсутність небезпечних для персоналу обертових елементів, плавність регулювання реактивної потужності, яка видається в мережу.

Завдяки даним пристроям ми маємо можливість здійснювати векторне регулювання - одночасно змінювати модуль і фазу напруги, забезпечуючи зниження втрат в мережах і компенсацію реактивної потужності основних частоти. СКРП призначаються для виконання завдань по фільтрації вищих гармонік, компенсації параметрів напруги і для вирівнювання симетрії напруги мережі.

Також це відноситься до багаточастотним фільтрокомпенсуючим пристроям і до ряду інших технічних засобів малопотворювального перетворення енергії і корекції режимів в СЕСП спільного і спеціального призначення.

Проблема забезпечення показників якості електроенергії в СЕСП в даний час в певній ступені трансформується в більш конкретну проблему. У проблему підвищення ефективності перетворення енергії на базі пристроїв силовий перетворювальної техніки (СПТ) шляхом максимально можливого удосконалення цих пристроїв.

Разом з тим вагому роль несуть досягнення таких показників споживчої вартості (конкурентоспроможності), як спрощення схемних структур, уніфікація та взаємозамінність окремих елементів, вузлів і модулів, зменшення встановленою потужності обладнання, забезпечення високою надійності, живучості, ремонтпридатності, реконструкції та модернізації.

Усе ці фактори, з теоретичної точки зору, не завжди є принциповими в складових комплексу показників споживчої вартості промислової продукції, в своїй сукупності вирішальним чином визначають практичну перспективу масового застосування будь-яких технічних нововведень, в числі яких засоби перетворення енергії і забезпечення ПЯЕ в СЕСП не можуть претендувати на якесь винятки.

Вище перелічене визначає актуальність проблеми підвищення ефективності і перетворення енергії в СЕСП за рахунок розробки і обґрунтування ряду нових технічних рішень, що забезпечують більш високі показники споживчої вартості таких пристроїв як БВП, ТРМ, ТКРП і ФКП, надають помітний вплив на систему електропостачання промислових підприємств[9].

Джерелами вищих гармонік струмів і напруг в розподільчих мережах є нелінійні навантаження, представлені вентиляними перетворювачами, газорозрядними лампами, TV- обладнанням, мікрохвильовими печами, комп'ютерною технікою і т.д.

Вищі гармоніки струму і напруги несприятливо впливають на роботу електричних мереж і деяких електроприймачів - системи автоматизації, релейного захисту, телемеханіки і мереж зв'язку. Вплив вищих гармонік сприяє появі втрат в електричних мережах та трансформаторах, яке приводить до погіршення умов компенсації реактивною потужності, що веде до швидкого старінню ізоляції і зменшення терміну служби загалом всієї розподільчої системи .

Тому в ряді випадків потрібна розробка спеціальних заходів для покращення форми кривої напруги в електричній мережі.

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

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 проблем пов'язані з перетворювальними трансформаторами і повинні наважуватися прискореними темпами [1]:

1. Підвищення одиничної потужності трансформаторів з метою зниження питомої матеріаломісткості і підвищення ККД обладнання;

2. Розробка економічних схем пристроїв, що підвищують фазність перетворення і покращують форму кривої споживаного струму;

3. Розробка і впровадження мір, що забезпечують підвищення коефіцієнта потужності перетворювальних агрегатів.

Значну роль в підвищенні енергоефективності для систем електропостачання займає силова електроніка, через те, що всі методи оптимізації енергопостачання основані на енергії управління об'єктом. Всі процеси, що ґрунтуються на перетвореннях за допомогою пристроїв з вентильною групою, були розроблені не так давно. Широке поширення в розподільчих мережах перетворювальні установки отримали в 50-х роках, після створення силових напівпровідникових приладів (СПП): діодів і тиристорів.

До основних напрямків підвищення ефективності вентильних пристроїв відносяться [5]:

1. Збільшення фазності перетворення;
2. Поділ по управлінню;
3. Штучна комутація.

Загальновизнаною мірою покращення енергетичної сумісності вентильних перетворювачів (ВП) з мережею живлення є підвищення фазності перетворення електроенергії. Тому актуальним є проведення досліджень і розробок, спрямованих на створення вентильних перетворювачів підвищеної фазності.

## **2.2 Закономірності фазних струмів багатофазних вентильних перетворювачів (БВП)**

Відомим способом досягнення еквівалентного режиму перетворення енергії є штучний поворот на кут  $\delta$  щодо векторів напруг на входах вентильних мостів.

Це забезпечується декількома способами[2]:

1. за рахунок системи управління;
2. з застосуванням спеціальних фазоповоротних пристроїв;

3. за рахунок секціонування обмоток трансформаторів.

Багатофазний еквівалентний ( $6m$ -фазний) вентильний перетворювач komponується з кількох ( $m$ ) шестифазних перетворювачів, з'єднаних між собою по ланцюгам постійного струму послідовно чи змінно. Вектори трифазних систем випрямлення напруги окремих перетворювачів БВП зрушені відносно друг друга на кут  $\delta=2\pi/6m$  [2].

З огляду схемного різноманіття БВП певний практичний інтерес викликає їх попередній порівняльний аналіз по ряду показників, що передують більш тривалим та трудомістким детальним дослідженням. Аналіз відомих результатів і дослідження ряду нових схем БВП дозволили прийти до висновку, що деякі їх найбільш суттєвих показників можуть бути отримані на підставі загальних закономірностей. Частково або повністю абстрагованих від конкретної структури або схем з'єднання обмоток перетворювальних трансформаторів БВП.

До таких закономірностей насамперед слід віднести зв'язок форми і гармонійного складу фазного струму в живильною мережі з відомими заздалегідь формою і гармонійним складом фазних струмів на вході вентильних мостів (ВМ) при різних кутах і зв'язок між знаком кута повороту і схемою підключення трансформаторів до мережі живлення.

Аналітичний доказ зазначених закономірностей для БВП (при з'єднанні первинних обмоток трансформаторів зіркою і трикутником) дано в роботах В.І. Сенько, А.А. Булгакова і А.В. Посі [1,5].

Наведено також доказ ширшої спільності названих закономірностей під час вирішення завдань оптимальних режимів системи живлення і синтезу схем БВП (у том числі і при інших схемах з'єднання первинних обмоток трансформаторів).

Незалежно від схем з'єднання обмоток трансформаторів, вирази, зв'язуючі миттєві значення фазних струмів шестифазного вентильного перетворювача (ВП-6) має вигляд:

$$i_L = \frac{2}{3 \cdot K_T} \cdot i_l \cdot \sin \frac{\pi}{3} - \delta - i_{l \pm 1} \cdot \sin \delta, \quad (2.1)$$

де  $i_L$  – струм  $L$ -ої фази на вході трансформатора,  $i_l$  – струм  $l$ -ої фази на вході ВМ,  $l+1$  – струм попередньої фази у послідовності А, В, С, А;  $l-1$  – струм наступної фази в послідовності А, В, С, А;  $K_T = U_L/U_l$  – результуючий коефіцієнт трансформації.

Знак «+» ставиться при випереджаючому углі повороту  $\delta$  векторів випрямлених напруг щодо векторів напруг на в ході перетворювача.

Знак «-» - при відстаючому вугіллі повороту  $\delta$ .

Величини гармонійних складових струму будь-якої  $L$ -ої ( $L=A, B, C$ ) фази на вході трансформатора пов'язані з величинами гармонійних складових струму однойменної  $l$ -ий ( $l=a, b, c$ ) фази на в ході ВМ при відомому  $\delta$  незалежно від конкретної схеми з'єднання обмоток трансформаторів залежностями [4]:

$$\begin{aligned} I'_m(n)L &= I'_m(n) \cdot l \cdot \cos 6k\delta + I'_m(n) \cdot l \cdot \sin 6k\delta \\ I''_m(n)L &= I''_m(n) \cdot l \cdot \cos 6k\delta + I''_m(n) \cdot l \cdot \sin 6k\delta \end{aligned} \quad (2.2)$$

Аналіз зв'язку миттєвих значень фазних струмів на в ході перетворювального трансформатора і на в ході ВМ показав, що ця зв'язок не залежить від конкретної схеми з'єднань секцій обмоток трансформатора, а повністю визначається знаком і величиною кута повороту векторів вихідних напруг ВП щодо векторів напруг мережі живлення.

### **2.3 Розрахунок встановленої потужності трансформаторного обладнання БВП**

Режим роботи перетворювальних трансформаторів як правило відрізняється від режиму роботи силових понижуючих або підвищувальних трансформаторів. Ці відмінності обумовлюються тим, що вентиляльні обмотки обтікаються струмом, які значно відрізняються формою від синусоїди. Внаслідок різного характеру зміни в часі струмів, що протікають за вторинними та первинними перетворювальними обмотками трансформаторів,



вольтамперні потужності цих обмоток загалом неоднакові. У зв'язку з цим розрахункову потужність перетворювального трансформатора  $S_T$  представляють як півсуму потужностей первинної  $S_{1T}$  і вторинної  $S_{2T}$  обмоток  $S_T = \frac{(S_{1T} + S_{2T})}{2} = \frac{(S_{W1} + S_{W2} + S_{W2})}{2}$ , а потужність кожної обмотки  $S_W$  - як добуток діючих значень довго допустимих струму  $I_W$  і напруги  $U_W$  цієї обмотки  $S_W = I_W \cdot U_W$ .

У перетворювачах з підвищеною еквівалентною фазністю (18, 24 - пульсні і т.д.), досягається за рахунок застосування фазоповоротних трансформаторів (ФПТ) або трансформаторів з різними схемами з'єднання обмоток, коли сумарна встановлена (типова) потужність трансформаторів  $S_{T\Sigma}$  перевищує сумарну потужність вентиляльних мостів  $S_{M\Sigma}$ . Це перевищення залежить від конкретної схеми і кількісно наочно може бути відображено коефіцієнтом перевищення типової потужності  $K_S$  [4]:

$$K_S = \frac{S_{T\Sigma}}{S_{M\Sigma}} . \quad (2.3)$$

Величини додаткової типової потужності трансформаторів, які розрізняються між собою ( $K_{Sk} \neq K_{Sj}$ , де  $k, j$  - порядкові номери трансформаторів) приводять до відмінності величин індуктивності контурів комутації вентиляльних мостів (ВМ) ( $X_k \neq X_j$ ) і, як наслідок, до виникнення неканонічних гармонік у фазних струмах мережі та випрямленій напрузі. При цьому позитивний ефект підвищення еквівалентної фазності перетворення енергії знижується [2,4].

Порівняння великої кількості схемних рішень БВП з погляду зменшення типової потужності, виявлення дійсно технічно доцільних та економічно обґрунтованих варіантів можливо лише на основі загальних для всіх схем БВП методів, до яких може бути віднесено метод порівняння за величиною коефіцієнта.  $K_S$  У зв'язку з цим необхідна розробка загальної методики розрахунку встановленої потужності трансформаторного обладнання БВП.

Число різних варіантів БВП досить велике, тому обмежимося розглядом

найбільш типових схем ВП-6, які являють собою за компонованням та характером електромагнітних процесів у них досить самостійними фрагментами деяких еквівалентних БВП, що за необхідності дозволить проаналізувати будь-яку конкретну схему.

Користуючись загальноприйнятими для дослідження потужних перетворювачів зневагами струмами намагнічування та явищем насичення сталі магнітопроводу [6], значення напруги на кожній з обмоток трансформатора  $U_W$  вважатимемо пропорційною модулю відповідного вектора, а сумарна магніторушійна сила (МРС) обмоток кожного стрижня дорівнює нулю в будь-який момент часу. Нехай напруга мережі  $U_C$  (симетрична система  $U_{AC}, U_{BC}, U_{CC}$ ), максимальна напруга  $U_{d0}$  та струм навантаження  $I_d$  задані. За відомі величини приймемо максимальну потужність навантаження  $P_{d0} = U_{d0} \cdot I_d$  і вольтамперну потужність  $S_M = 3 \cdot I_M \cdot U_M$ , де  $I_M = I_a$ ,  $U_M = U_a$  - діючі значення фазних струмів і напруг на виході ВМ.

При миттєвій комутації вентилів та відсутності пульсацій струму навантаження  $S_M = 1,05 P_{d0}$ .

Зазначимо, що при використанні схем з'єднання обмоток зіркою та трикутником  $K_S = 1$ . Для будь-якої схеми з'єднання секцій обмоток трансформатора ВП-6 миттєві значення фазних струмів мережі визначаються

у вигляді загальної залежності [7]  $i_A = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot K_T} \cdot \left[ i_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \delta\right) - i_b \cdot \sin \delta \right]$ , де

коефіцієнт трансформації та кут  $\delta$ :  $K_T = \frac{W_1}{\sqrt{W_2^2 + W_2 \cdot W_3 + W_3^2}}$ ,

$$\delta = \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{W_2^2 + W_2 \cdot W_3 + W_3^2}}.$$

При використанні в БВП перетворювальних трансформаторів з схемою з'єднання секцій обмоток (як первинних, так і вторинних) зигзагом обмотки можуть бути включені згідно або зустрічно. Потужність первинної і вторинної обмоток, з'єднаних зіркою визначається по формулі:

$$S_Y = 3 \cdot I_M \cdot U_M = S_M \quad (2.4)$$

За потужність секцій обмоток  $W_2$  при відповідному включенні визначається згідно з таким виразом [8]:

$$S_{W_2} = 3 \cdot I_M \cdot U_M \cdot \frac{\sin \delta}{\sin \frac{\pi}{3}} = S_M \cdot \frac{\sin \delta}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (2.5)$$

Загальна потужність вторинних обмоток трансформатора визначається по формулі [8]:

$$S_{2T} = S_{W_1} + S_{W_2} = 2 \cdot S_M \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} - \delta\right) \quad (2.6)$$

Загальна встановлена потужність трансформатора обчислюється наступного виразу [9]:

$$S_{W_3} = 3 \cdot I_M \cdot U_M \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3} - \delta\right)}{\sin \frac{\pi}{3}} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3} - \delta\right)}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (2.7)$$

Коефіцієнт перевищення встановленою потужності трансформатора [9]:

$$K_s = 0,5 + \cos\left(\frac{\pi}{3} - \delta\right) \quad (2.8)$$

Як видно, при використанні в БВП схеми з'єднання обмоток трансформаторів зигзагом зустрічне включення секцій обмоток забезпечує значно менше збільшення встановленою потужності трансформаторного обладнання і згідне з'єднання секцій трансформатора практично недоцільно. З точки зору встановленої потужності трансформаторів з секціюванням обмоток найбільш раціональними є схеми з з'єднанням секцій обмоток ковзними трикутниками.

У схемах багатофазних перетворювачів з ФПТ додаткова встановлена потужність трансформаторного обладнання визначається з допомогою фазоповоротних трансформаторів. Встановлення ФПТ принципово не вирішує в небудь-якій ступені завдання зменшення встановленою потужності головних перетворювальних трансформаторів (ГТ), потужність кожного з останніх

повинна дорівнювати повній потужності ВМ. Схеми багатофазних перетворювачів з каскадним з'єднанням вентильних обмоток трансформаторів дозволяє зменшити загалом одиничну потужність трансформаторного обладнання ВП [3].

У таблиці 2.1 наведено залежності  $K_S$  від кута повороту  $\delta$  для основних схем ФПТ і іскаскадного з'єднання вентильних обмоток трансформаторів.

Таблиця 2.1 – Залежність  $K_S$  від кута повороту  $\delta$  для основних схем з ФПТ і каскадного з'єднання вентильних обмоток трансформаторів

ГТ		ФПТ		Залежність	Коефіцієнт перевищення потужності					
1- нна обмо- тка	2- нна обмо- тка	1- нна обмо- тка	2- нна обмо- тка		Кут здвигу $\delta$ (ел.град.)					
					5	7,5	10	15	22,5	30
Y	Y	Y	Y	$1 + \sin / \sin \frac{\pi}{3}$	1,074	1,11	1,143	1,207	1,293	1,366
Y	Y	$\Delta$	Y	$1 + \sin \delta$	1,023	1,033	1,043	1,058	1,072	1,077
$\Delta$	Y	$\Delta$	Y							
Каскадне з'єднання вентильних обмоток				$4 \sin \frac{\pi}{12} \cdot \cos(\frac{\pi}{12} - \delta)$	1,01	1,014	1,016	1,018	1,014	1
Y	Y	Y	$\Delta$							
$\Delta$	Y	Y	Y							

### Висновки по другому розділу

З аналізу розрахунків та даних таблиці 7 слідує, що деяке зменшення встановленої потужності ФПТ досягається використанням схем, у яких первинні обмотки ФПТ з'єднані трикутником. Застосування схем з каскадним з'єднанням вентильних обмоток перетворювальних трансформаторів забезпечує мінімальне перевищення встановленої потужності трансформаторного обладнання ВП.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОФАЗОВИХ ВЕНТИЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

#### 3.1 Ефективність використання БВП для забезпечення якості електроенергії

На даний момент час у системах електропостачання підприємств кольоровий металургії широке поширення отримали схеми з багатофазним перетворенням. В першу чергу до таких підприємств відносяться алюмінієві заводи. При переробці сплавів алюмінію шляхом електролізних ванн зазвичай застосовують 12, 24, 36 і 48-фазні схеми перетворення. При цьому потужність на введенні кремнієвоперетворювальної підстанції (КПП) великого підприємства може перевищити 60МВА, а число таких вводів досягає 20 і більше [9].

У таких умовах електропостачання КПП відбувається безпосередньо від мереж високої напруги (110-220кВ) через силові трансформатори. Незважаючи на це, значна частина перетворювальної потужності навантаження, місцями досягають потужностей живильної енергосистеми, що сприяє погіршенню показників якості електроенергії (ПЯЕ) не тільки на шинах 6-10кВ заводу, але і в мережах 110-220кВ.

Як відомо, перетворювачі є джерелами вищих гармонік струму, які, у свою чергу, визначають спотворення синусоїдальності напруги у вузлах мережі, що характеризуються значеннями  $K_{U(n)}$  та  $K_U$  [9]. Порядок непарних складових вищих гармонік струму, крім гармонік кратних трьох, має залежність від схеми перетворювача та його пульсності або числа фаз перетворення. Цей ряд визначається формулою  $n = pk + 1$ , де  $p$  - пульсність перетворювача,  $k = 1, 2, 3 \dots$

Гармоніки з вищим порядком досить часто компенсуються при застосованні схеми перетворення, що визначаються за формулою [2]

$$n = \frac{p}{2} \cdot (2k - 1) \pm 1. \quad (3.1)$$

Звідси витікає, що 6-пульсний перетворювач генерує непарні гармоніки,

починаючи з 5-ї, 12-пульсний - починаючи з 11-ої. При цьому 5,7,17,19,29 і 31-а компенсуються в схему самого перетворювача [5].

Досить часто шаблі нижчого порядку перетворення застосовуються 6-пульсні схеми, з яких складаються 12-пульсні. Це допомагає прибирати найбільш негативні вищі гармоніки (5 і 7-ю), амплітуди яких у першому наближенні дорівнюють  $1/5$  та  $1/7$  від споживаного струму, що сприяє погіршенню енергосистеми загалом. Проте, недоторкані вищі гармоніки струму порядків  $n=11,13,23,25,35$  і  $37$  досить значні, щоб, як показали досліди, створювати спотворення напруги в високовольтних мережах (до 220 кВ включно), перевищують допустимі за ДСТУ 2815-1994 [11] значення. У зв'язку з цим на підприємствах застосовують 36- і 48-фазні схеми перетворення, які, як буде показано нижче, дозволяють компенсувати вищі гармоніки порядків  $n=11,13,23,25$  (для 36-фазної), і навіть  $n=35,37$  (для 48-фазної).

### **Варіанти багатофазних схем перетворення і їх ефективність.**

Компенсація гармонік вищого порядку при багатофазних схемах перетворення виконується при допомозі забезпечення фазових зрушень кутів струмів, які протікають в двообмотковому трансформаторі з розщепленими вентильними обмотками, або в мережевих обмотках групи трансформаторів, підключених на шини однієї системи, або і того чи іншого способу. Для даних цілей встановлюються спеціальні трансформатори з різними схемами з'єднання обмоток. Нижче розглянуті особливості компенсації вищих гармонік струму для різних схем перетворення.

Як правило, зсув фаз дорівнює куту між векторами струмів основної частоти і визначається фазністю перетворення як  $\alpha^{(1)} = 360^\circ / p$ . Так, цей кут становить  $\alpha^{(1)} = 30^\circ$  при 12-фазному перетворенні,  $\alpha^{(1)} = 15^\circ$  при 24-фазному,  $\alpha^{(1)} = 10^\circ$  при 36-фазному,  $\alpha^{(1)} = 7,5^\circ$  при 48-фазному [2]. Отриманий при цьому показник за умов близьких до ідеальних (симетрія струмів вищих гармонік, опорів фаз трансформатора тощо) можна побачити в таблиці 3.1. Однією з умов таблиці - компенсація вищих гармонік виконується каскадно. Це означає,

що 24-фазний перетворювач може складатися з двох 12-фазних, а 36-фазний з трьох. У 48-фазному перетворювачі містяться каскади 12 та 24-фазного перетворювача. Так, наприклад, 5 і 7 гармонії вищого порядку можна компенсувати тільки 12-фазним перетворенням.

Фазовий зсув гармонік вищого порядку представлені кутами  $\alpha^{(1)}$  і гармоніками  $n$ -ого порядку так, що  $\alpha^{(1)} = n \alpha^{(1)}$ . Чималий вплив на систему надають напрямки векторів у системі, отриманих при впливі гармонік прямої та зворотної послідовностей. Трифазні струми з промисловою частотою, як правило, утворюють систему прямої послідовності, обертання векторів у цій системі відбувається проти годинникової стрілки.

Таблиця 3.1 - Каскадна компенсація гармонік вищого порядку  $n$ - фазних схемах перетворення

№ перетворення	Порядковий номер гармонік вищого порядку											
	5	7*)	11	13*)	17	19*)	23	25*)	29	31*)	35	37*)
12	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
24	-12	-12	-24	-24	-12	-12	+	+	-12	-12	-24	-24
36	-12	-12	-36	-36	-12	-12	-36	-36	-12	-12	+	+
48	-12	-12	-24	-24	-12	-12	-48	-48	-12	-12	-48	-48

Умовні позначення:

\*) - вищі гармоніки при прямій послідовності

"+" - гармоніки присутні у мережній обмотці трансформатора

"-" - гармоніки відсутні в мережевий обмотці трансформатора

12,24,36,48 - Схеми перетворення, при допомозі яких виконується компенсація вищих гармонік.

Для того, щоб знайти вектор гармонік струму вищого порядку прямої послідовності одного з  $n$  порядку фазового зсуву, знаходиться по формулою, розраховує в комплексній системі координат від дійсною осі [8]

$$I_{kc}^{(n)} = I_{kp}^{(n)} \cdot e^{-j\alpha^{(1)}(-1)^n}, \quad (3.2)$$

де  $I_{kc}^{(n)}$  та  $I_{kp}^{(n)}$  - виражають струми в первинній та вторинній обмотках трансформаторів,  $k$  - нумерація гілки в  $p$ -фазній перетворюючої системі.

За таких умов фазність струмів гармонік вищого порядку в первинній обмотці знаходиться з формули[8]:

$$\alpha_c^{(n)} = -\alpha_{np}^{(1)} \cdot (1 - n) . \quad (3.3)$$

Припустимо, що в 12-фазній перетворюючій схемі (  $\alpha^{(1)} = 30^0$  ) застосовується силовий трансформатор, що має роздвоєну обмотку вентильного типу Y/Y/ $\Delta$  Зсув фаз при схемі з'єднання Y/Y ( $k=1$ )  $\alpha_1^{(1)}=0$  , а при схемі з'єднання Y/ $\Delta$  ( $k=2$ )  $\alpha_2^{(1)}=30^0$ . При цьому 7-а гармоніка має струмові фазові зрушення рівні:  $\alpha_1^{(7)} = 30^0$  а  $\alpha_2^{(7)} = -30^0(1 - 7) = 180$  . Іншими словами, дані значення струмів у первинній обмотці виявляються в негативному значенні фаз, за їх рівності можна вважати що їх сума  $I_1^{(7)} + I_2^{(7)} = 0$ .

За таких умов і виконується принцип компенсації.

Для струмів гармонік вищого порядку зворотній послідовності, враховуючи їх протилежне обертання векторів, можна, можливо знайти їх зрушення фаз по формулі  $I_{kc}^{(n)} = I_{kp}^{(n)} \cdot e^{-j\alpha^{(1)}(-1)^n}$  , і тоді рівність (3.3) прийме вигляд:

$$\alpha_c^{(n)} = -\alpha_{np}^{(1)} \cdot (1 + n) . \quad (3.4)$$

Тому можна, можливо прийняти, що для 5-ий гармоніки перебування зсувуфаз знаходиться:

$$\alpha_1^{(5)} = 0,$$

$$\alpha_1^{(5)} = -30^0(1+5) = -180^0,$$

$$I_1^{(5)} + I_2^{(5)} = 0.$$

У ряді випадків, рідко виходить утримати сталість фазного кута кількості  $\alpha_1^{(1)}$  кількості фазного перетворення  $p$ . Іншими словами, фактичним кутам допускається відрізнятись від розглянутих прикладів. Це відбувається через наступних факторів:

- конструктивно дуже складно підібрати кількість витків трансформатора, при схемі з'єднання зірка і трикутник з збільшеною стороною;
- необхідність змінювати показники якості напруги при використанні РПН трансформатора, що саме по собі веде до зміни кількості витків



первинної обмотки трансформатора і виходять, зміни не тільки амплітуди, а й фази вентильної обмотки того ж трансформатор.

Ефективність компенсації вищих гармонік прийнято оцінювати по коефіцієнту некомпенсованості  $k_{BG}$ , що визначається для кожної гармоніки як [5]:

$$k_{BG} = \frac{\sum_{k=1}^k I_k^{(n)}}{\sum_{k=1}^k |I_k^{(n)}|} . \quad (3.5)$$

Отже, у разі повної компенсації  $\sum_{k=1}^k I_k^{(n)} = 0$  та  $k_{BG} = 0$ . В цілому, багато залежить від схеми перетворення,  $0 \leq k_{BG} \leq 1$ .

У схеми, наведеної на рисунку 3.1, три групи КПП, кожна з яких утворена двома КПП (1 і 2, 3 і 4, 5 і 6), мають однакові схеми з'єднання обмоток трансформаторів перетворювачів. При цьому фазовий кут між групами гілок становить  $\alpha = 10^\circ$  ( $\alpha_1 = -10^\circ, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = +10^\circ$ ). Тоді для гармонік, що утворюють пряму послідовність, кут  $\alpha_k^{(n)}$  повороту вектора  $n$ -ої гармоніки  $\alpha_k^{(n)} = -\alpha_0(1-n)$  а для гармонік, що утворюють зворотну послідовність,  $\alpha_k^{(n)} = -\alpha_0(1+n)$ . Тут  $\alpha_0 = \alpha_k$ . Результати розрахунку положення векторів усіх враховуючих ВГ наведені в таблиці 3.2.  $\alpha_k^{(n)}$

Таблиця 3.2 - Фазові кути в 36-фазній схемі

$\alpha$	Порядок гармонік											
	5	7*	11	13*	17	19*	23	25*	29	31*	35	37*
$\alpha_1^{(n)}$	-60	60	-120	120	-180	180	-240	240	-300	300	-360	360
$\alpha_2^{(n)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\alpha_3^{(n)}$	60	-60	120	-120	180	-180	240	-240	300	-300	360	-360
$k_{BG}$	0,67	0,67	0	0	0,33	0,33	0	0	0,67	0,67	1	1

\* - ВГ прямий послідовності

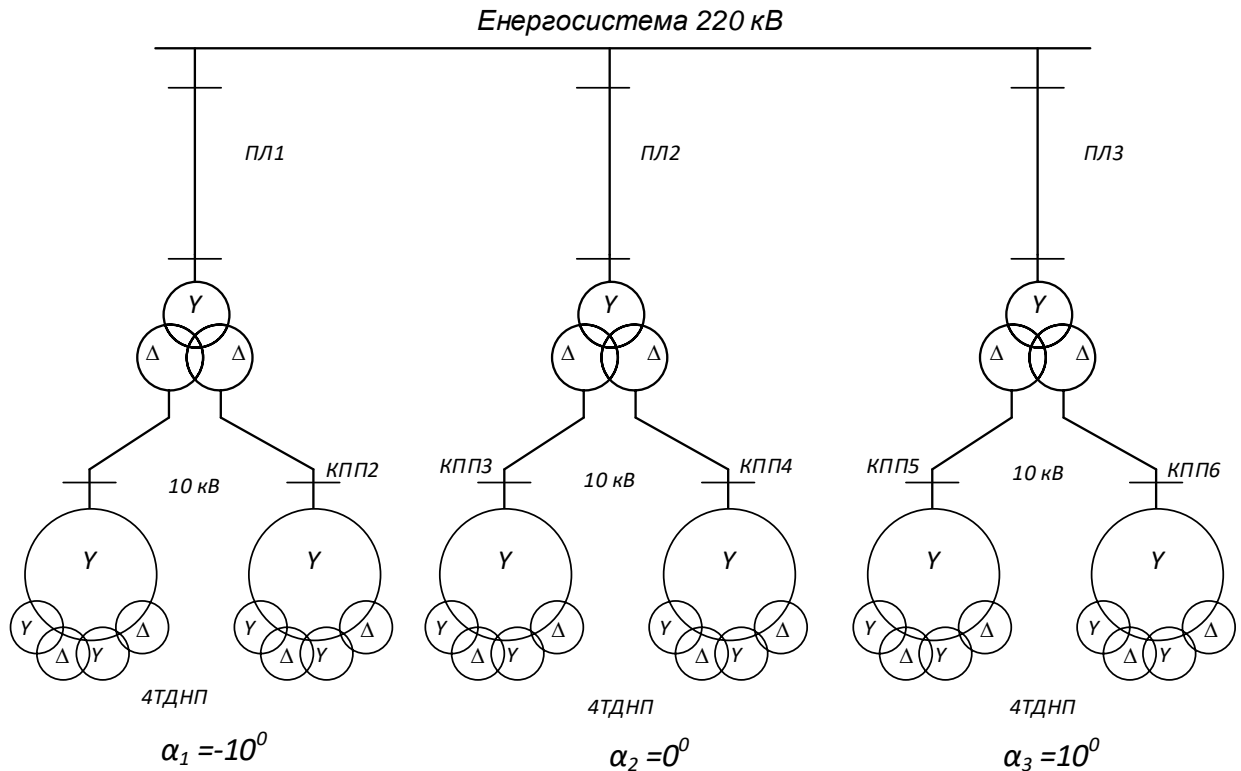


Рисунок 3.1 – Фрагмент системи електропостачання за 36-фазної схеми перетворення

При цьому коефіцієнт некомпенсованості [2]:

$$k = \frac{\sum_1^3 I^{(n)}}{\sum_1^3 |I^{(n)}|} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_1^n + I_2^n + I_3^n} = \frac{I^{(n)} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{3 \cdot I^n} = \frac{1}{3} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3).$$

Наприклад для  $n = 5$

$$k = \frac{1}{3} \cdot \cos(-60^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(60^\circ) = \frac{1}{3} \cdot (0,5 + 1 + 0,5) = 0,67.$$

Недолік цієї схеми полягає в тому, що не компенсовані гармоніки з  $n=5,7,17,19,29,31,35$  і  $37$  виносяться межі шин, з яких живляться трансформатори перетворювачів. Таким чином, ці гармоніки проникають у мережу вищої напруги, де і створюють спотворення напруги. Також виносяться в мережу і  $11, 13, 23$  і  $25$  гармоніки, які взаємокомпенсуються ( $k_{ВГ} = 0$ ) у вузловій точці цієї мережі. При цьому не виключаються резонансні явища, зростають втрати потужності та електроенергії у мережі. Щоправда, слід мати на увазі, що з некомпенсованих 36-фазною схемою гармонік  $5$  і  $7, 17$  і  $19, 29$  і  $31$  можуть компенсуватися в кожному з перетворювальних

трансформаторів КПП, кожен з яких працює на 12-пульсній перетворювачі.

А вони відповідно до розрахункової формули  $n = \frac{p}{2} \cdot (2k - 1) \pm 1$  дозволяють компенсувати саме 5 і 7, 17 і 19, 29 і 31 гармоніки. Однак це справедливо лише в ідеальних умовах і за  $\alpha = 10^0$ , що на практиці здійснити важко. Так, під час роботи РПН на трансформаторі перетворювача, зазвичай,  $\alpha \neq 10^0$ . Отже в мережу проникають не тільки 35 і 37-а гармоніки, а й 11, 13, 23 і 25-та, які мали б повністю компенсуватися в мережі при  $\alpha = 10^0$ .

У будь-яких обставинах кращі такі схеми компенсації ВГ, які виключали б можливість проникнення цих гармонік в мережу або зводили такий ефект до мінімуму. Така схема представлена рисунку 3.2.

У такій схемі робота перетворювачів 1,2 і 3 на КПП-1 і 5, 6 і 7 на КПП-2 дадуть такий же ефект компенсації струму ВГ, як і в класичній схемі. Але тепер гармоніки, що генеруються цими перетворювачами, крім 35 і 37-ої, компенсуються в межах шин 10кВ КПП.

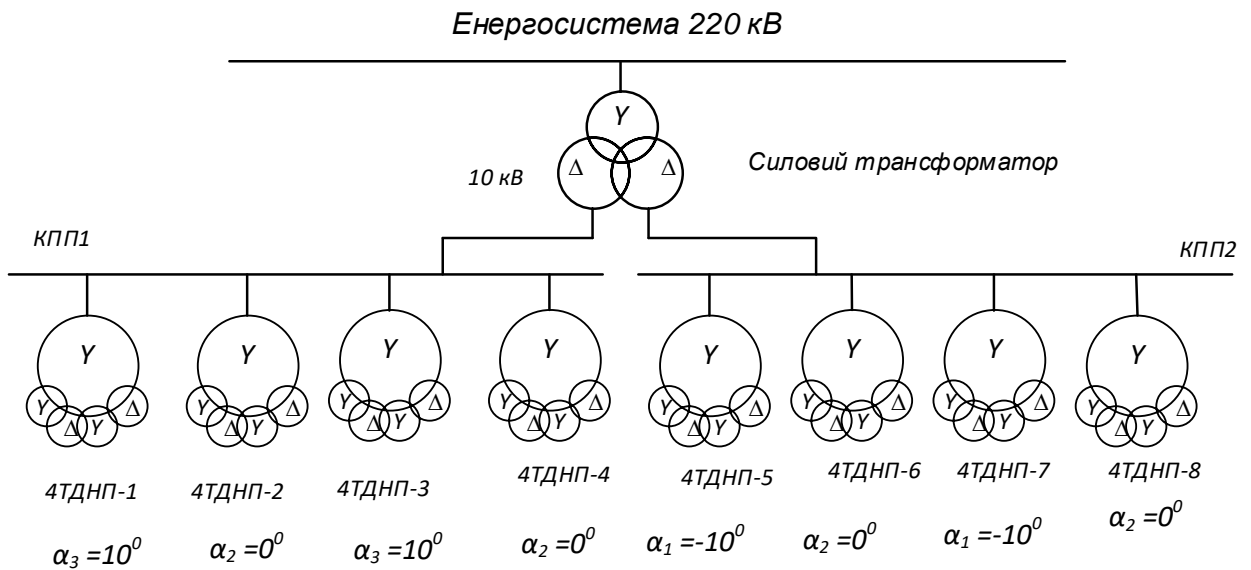


Рисунок 3.2 – 36-фазна схема компенсації гармонік на шинах

Некомпенсованими залишаються 11 і 13, 23 і 25, 35 і 37-та гармоніки, генеровані тільки перетворювачами 4 і 8. При цьому, якщо  $\alpha_4^{(n)} = 0$ , а  $\alpha_8^{(n)} = 10^0$ , тоді:

$$k_{ВГ} = \frac{1}{2} \cdot e^{j\alpha_4^{(n)}} + e^{j\alpha_8^{(n)}} = \frac{1}{2} \cos \alpha_4^{(n)} + j \sin \alpha_4^{(n)} + \cos \alpha_8^{(n)} + j \sin \alpha_8^{(n)},$$

що дає для кожної із цих гармонік  $k_{BG}=0,5$ .

Так, наприклад, для  $n=1$

$$k_{BG} = \frac{1}{2} \cos 0 + j \sin 0 + \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) = \frac{1}{2} \left[ 1 - 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right].$$

Оскільки модуль сумарного струму (у дужках) дорівнює одиниці, то  $k_{BG} = 0,5$

Такі ж значення  $k_{BG}$  має і для 13, 23, 25-й гармонік, так як сумарні вектори розташовуються в позитивній напівплощині під кутом  $\pm 60^\circ$ .

Іншими словами, струми зазначених ВГ, що генеруються перетворювачами 4 і 8 послаблюються в 2 рази. Враховуючи, що ці ж гармоніки, що генеруються перетворювачами 1,2,3 і 5,6,7, повністю компенсуються на шинах, відповідно, КПП-1 і КПП-2, то коефіцієнт некомпенсованості за цим ВГ на шинах системи (рисунк 1.2) складе всього  $k_{\text{системи}}^{(11,13,23,25)} = 0,5/8 = 0,0625$ .

Перевага 48-фазних схем у порівнянні з 36-фазними полягає в найбільш вірогідний через те, що вони працюють на шини постійного струму.

Зазначені гармоніки компенсуються в межах шин 10кВ, від яких отримують живлення ці перетворювачі. Завдяки цьому ВГ не вносяться у мережу ВН, а й не завантажують мережевий трансформатор 220/10кВ.

Для забезпечення 48-фазного режиму вектори струмів мережних обмоток кожного з чотирьох трансформаторів перетворювачів повинні бути розгорнуті один до одного на  $\alpha^{(1)} = 360^\circ / 48 = 7,5^\circ$ . В даний момент на вітчизняних заводах експлуатуються трансформатори з фазовими кутами  $\alpha_1^{(1)} = -11,25^\circ$ ;  $\alpha_2^{(1)} = +3,75^\circ$ ;  $\alpha_3^{(1)} = -3,75^\circ$ ;  $\alpha_4^{(1)} = +11,25^\circ$ . При цьому ніби утворюється три каскади компенсації:

- 12-фазний в межах кожного трансформатора завдяки тому, що їх чотири вентиляльні обмотки зібрані попарно за схемою Y/Δ;

- 24-фазний у межах шин 10кВ, до яких приєднані попарно трансформатори, а їх мережеві обмотки з'єднані так щоб забезпечити відносний поворот векторів струму основний частоти на  $15^\circ$ . У розглянутому

випадку це досягається тим, що кутами  $\alpha_1^{(1)} = -11,25^0$ , а  $\alpha_2^{(1)} = +3,75^0$  та  $\alpha_3^{(1)} = -3,75$ , а  $\alpha_4^{(1)} = +11,25^0$ . Як впливає з таблиці 1.1, завдяки роботі з цих двокаскадних схем перетворення компенсуються всі ВГ, крім 23 і 25;

- 48-фазний в межах тих же шин 10кВ завдяки тому, що відносний поворот векторів струму основної частоти для непарної пари трансформаторів і парної пари становить  $\alpha_1^{(1)} = 7,5^0$ .

Векторна діаграма струмів у мережевих обмотках чотирьох перетворювачів показано малюнку 3.3.

Далі, використовуючи формулу  $\alpha_c^{(n)} = -\alpha_{np}^{(1)} \cdot (1-n)$  для гармонік, які утворюють пряму послідовність, і  $\alpha_c^{(n)} = -\alpha_{np}^{(1)} \cdot (1+n)$  для гармонік, які утворюють зворотню послідовність, можливо розрахувати кути повороту вектора цих гармонік в мережевій обмотці кожного із чотирьох трансформаторів. Наприклад для  $n=25$  (пряма)  $\alpha_k^{(25)} = -\alpha_k^{(1)} \cdot (1-n)$ , а для  $n=23$   $\alpha_k^{(23)} = -\alpha_k^{(1)} \cdot (1+n)$  (зворотня).

Тоді для  $n = 25$  одержимо, опускаючи індекс порядку гармоніки, для трансформаторів:

$$\alpha_1 = -11,25 \cdot (1-25) = 270^0;$$

$$\alpha_2 = 3,75 \cdot (1-25) = 90^0;$$

$$\alpha_3 = -3,75 \cdot (1-25) = -90^0;$$

$$\alpha_4 = +11,25 \cdot (1-25) = -270^0.$$

Тут вектори струмів для  $n = 25$  з кутами  $\alpha_1, \alpha_4$  та  $\alpha_2, \alpha_3$  виявляються в протифазі, чим забезпечується їх повна компенсація на шинах 10кВ.

Аналогічно для  $n=23$ :

$$\alpha_1 = -11,25 \cdot (1+23) = -270^0;$$

$$\alpha_2 = 3,75 \cdot (1+23) = +90^0;$$

$$\alpha_3 = -3,75 \cdot (1+23) = -90^0;$$

$$\alpha_4 = +11,25 \cdot (1+23) = +270^0;$$

Значення кутів  $\alpha_{1-4}^{(n)}$  для всіх непарних гармонік на шинах 10кВ наведено

у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Фазові кути гармонік струму за 48-фазної схеми перетворення

$\alpha$	Порядок гармонік											
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
$\alpha_1^{(n)}$	-67	67,5	-135	135	-202,5	202,5	-270	270	337,5	337,5	-45	45
$\alpha_2^{(n)}$	22,5	-22,5	45	-45	67,5	-67,5	90	-90	112,5	-112,5	135	-135
$\alpha_3^{(n)}$	-22,5	22,5	-45	45	-67,5	67,5	-90	90	-112,5	112,5	-135	135
$\alpha_4^{(n)}$	67,5	-67,5	135	-135	202,5	-202,5	270	-270	337,5	-337,5	45	-45
$k_{ВГ}$	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0

Неважко бачити, що коефіцієнт некомпенсації ВГ  $k_{ВГ} = 0$  для  $n=11, 13, 35$  і  $37$ , тобто вони повністю компенсуються, будучи в протифазі на виході мережних обмоток трансформаторів перетворювачів 1-2 і 3-4, що працюють з  $\alpha^{(1)} = 15^0$  (24-фазний режим). Такий же ефект спостерігається і для гармонік  $n = 23$  і  $25$ , але завдяки тому, що  $\alpha^{(1)} = 7,5^0$  для пар перетворювачів 1-4 і 2-3, що працюють в 48-фазному режимі.

Що ж до ВГ, для яких  $n=5, 7, 17, 19, 29, 31$ , то вони також повністю компенсуються, але на рівні 12-фазного перетворення, як це було показано вище.

Ефективність результуючої компенсації на шинах 10 кВ КПП, що складається з чотирьох перетворювачів при трикаскадній системі компенсації, наведена у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Ефективність результуючої компенсації за 48-фазної схеми

Схема перетворення	$k_{ВГ}$											
	Порядок гармонік											
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
12-фазна	0	0			0	0			0	0		
24-фазна			0	0							0	0
48-фазна							0	0				

### 3.2 Компенсація ВГ у 36-фазній схемі перетворення

У схемі, наведеній на рисунку 3.3, три групи КПП, кожна з яких утворена двома КПП (1 і 2, 3 і 4, 5 і 6), мають однакові схеми з'єднання обмоток

трансформаторів перетворювачів. При цьому фазовий кут між групами гілок становить  $\alpha=10^\circ$  ( $\alpha_1 = -10^\circ$ ,  $\alpha_2=0$ ,  $\alpha_3 = +10^\circ$ ). Тоді для гармонік, що утворюють пряму послідовність, кут  $\alpha_k^{(n)}$  повороту вектора n-ої гармоніки  $\alpha_k^{(n)}=-\alpha_0(1-n)$ , а для гармонік, що утворюють зворотну послідовність,  $\alpha_k^{(n)}=-\alpha_0(1+n)$ . Результати розрахунку положення векторів всіх ВГ, що враховуються, наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Фазові кути гармонік струму за 36-фазної схеми перетворення

$\alpha$	Порядок гармонік											
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
$\alpha_1^{(n)}$	-60	+60	-120	+120	-180	+180	-240	+240	-300	+300	-360	+360
$\alpha_2^{(n)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\alpha_3^{(n)}$	+60	-60	+120	-120	180	-180	+240	-240	+300	-300	+360	-360
$k_{ВГ}$	0,67	0,67	0	0	0,33	0,33	0	0	0,67	0,67	1,0	1,0

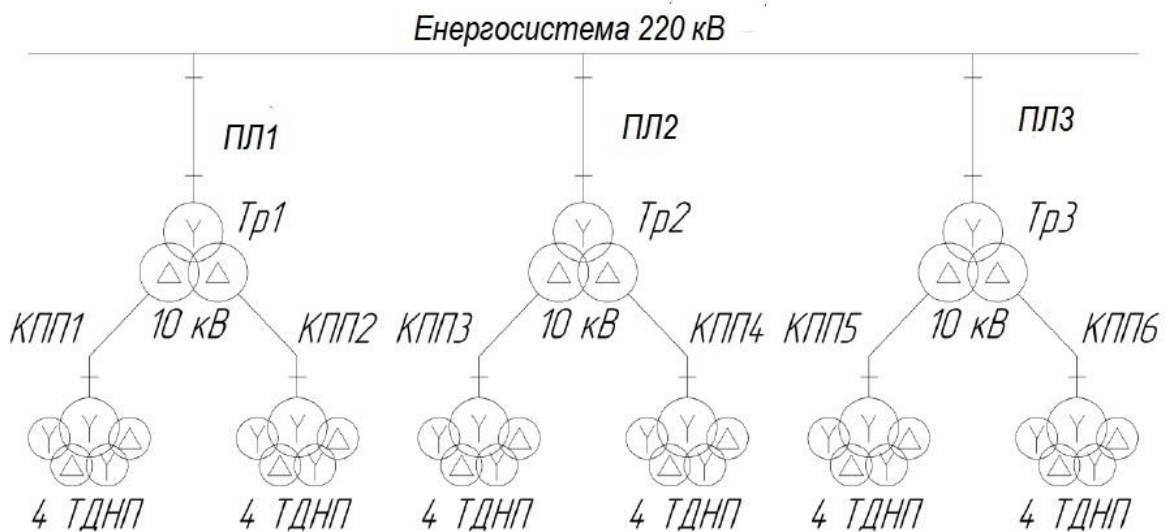


Рисунок 3.3 - Фрагмент системи електропостачання за 36-фазної схеми перетворення

При цьому коефіцієнт некомпенсованості:

$$K = \frac{\sum_1^3 \underline{I}^{(n)}}{\sum_1^3 |\underline{I}^{(n)}|} = \frac{\underline{I}_1^{(n)} + \underline{I}_2^{(n)} + \underline{I}_3^{(n)}}{I_1^{(n)} + I_2^{(n)} + I_3^{(n)}} = \frac{I^{(n)} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{3I^{(n)}} = \frac{1}{3} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)$$

Наприклад  $n = 5$

$$K = \frac{1}{3} \cdot \cos(-60^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(60^\circ) = \frac{1}{3} \cdot (0,5 + 1 + 0,5) = 0,67 .$$

Нестача цією схеми складається в тому, що некомпенсовані гармоніки з  $n=5, 7, 17, 19, 29, 31, 35$  і  $37$  виносяться за межі шин, від яких живляться трансформатори перетворювачів. Ці гармоніки проникають в мережа більше високого напруги, де і створюють спотворення напруги. Також виносяться в мережу та  $11, 13, 23$  та  $25$  гармоніки, які взаємокомпенсуються ( $k_{ВГ}=0$ ) у вузловій точці цієї мережі. При цьому не виключаються резонансні явища, зростають втрати потужності і електроенергії в мережі. З некомпенсованих 36-фазний схемою гармонік  $5$  і  $7, 17$  і  $19, 29$  і  $31$ -а можуть компенсуватися в кожному з перетворювальних трансформаторів КПП, кожен з яких працює на 12-пульсній перетворювачі (табл. 2.1).

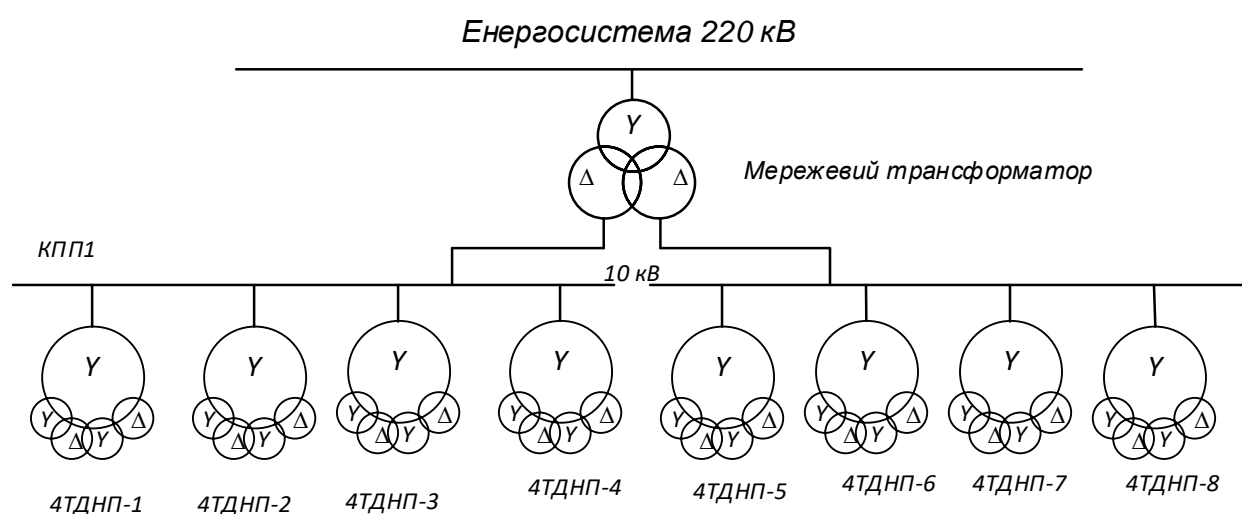


Рисунок 3.4 - 36-фазна схема компенсації гармонік на шинах заводу

На рисунку 3.4 представлена 36-фазна схема компенсації гармонік, що дозволяє виключити можливість проникнення гармонік у мережу або звести їх рівень до мінімуму, через практичну складність забезпечення ідеальних умов. У такій схемі робота перетворювачів 1, 2 та 3 на КПП- 1 і 5, 6 і 7 на КПП-2 дадуть такий самий ефект компенсації ВГ струму (табл. 1). Але гармоніки, що генеруються цими перетворювачами, крім 35 і 37-ої, компенсуються в межах шин 10 кВ КПП. Некомпенсованими залишаються 11 і 13, 23 і 25, 35 і 37-а



гармоніки, генеровані тільки перетворювачами 4 і 8. При цьому якщо  $\alpha_4^{(n)} = 0$ , а  $\alpha_8^{(n)} = +10^\circ$ , то

$$k_{BG} = \frac{1}{2} \cdot e^{j\alpha_4^{(n)}} + e^{j\alpha_8^{(n)}} = \frac{1}{2} \cos \alpha_4^{(n)} + j \sin \alpha_4^{(n)} + \cos \alpha_8^{(n)} + j \sin \alpha_8^{(n)}.$$

Наприклад для  $n = 11$

$$k_{BG} = \frac{1}{2} \cos 0 + j \sin 0 + \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right].$$

Струми зазначених ВГ, генеровані перетворювачами 4 і 8, послаблюються у 2 рази. Ці ж гармоніки, що генеруються перетворювачами 1, 2, 3 і 5, 6, 7, повністю компенсуються на шинах КПП1 і КПП2, коефіцієнт некомпенсованості за цими ВГ на шинах системи (рис. 3.4) складе всього

$$k_{\text{системи}}^{(11,13,23,25)} = 0,5/8 = 0,0625.$$

### 3.3 Компенсація ВГ в 48-фазній схемі перетворення

Перевага 48-фазних схем у порівнянні з 36-фазними полягає в тому, що теоретично повністю компенсуються всі непарні гармоніки до 37-й включно. Ефект компенсації може бути досягнуто в межах однієї КПП, де рівність струмів ВГ в кожному з чотирьох перетворювачів (на рис. 3.4 - перетворювачі 1-4 і 5-8) найбільш ймовірний, так як вони працюють на загальні шини постійного струму. Вказані гармоніки компенсуються в межах шин 10 кВ, від яких отримують живлення дані перетворювачі. Завдяки цьому ВГ не вносяться не тільки до мережі ВН, але й не завантажують мережевий трансформатор 220/10 кВ[9].

Для забезпечення 48-фазного режиму вектори струмів мережних обмоток кожного з чотирьох трансформаторів перетворювачів повинні бути розгорнуті один до одного на  $\alpha^{(1)} = 360^\circ/48 = 7,5^\circ$ . В даний час на вітчизняних алюмінієвих заводах експлуатуються трансформатори з фазовими кутами  $\alpha_1^{(1)} = -11,25^\circ$ ;  $\alpha_2^{(1)} = +3,75^\circ$ ;  $\alpha_3^{(1)} = -3,75^\circ$ ;  $\alpha_4^{(1)} = +11,25^\circ$ . При цьому утворюються три каскада компенсації:

- 12-фазний в межах кожного трансформатора завдяки тому, що їх чотири вентиляльні обмотки зібрані попарно за схемою Y/Δ;

- 24-фазний у межах шин 10 кВ, до яких приєднані попарно трансформатори, а їх мережеві обмотки з'єднані так, щоб забезпечити відносний поворот векторів струму основної частоти на  $15^\circ$ . У аналізованому випадку це досягається тим, що  $\alpha_1^{(1)} = -11,25^\circ$ ;  $\alpha_2^{(1)} = +3,75^\circ$ ;  $\alpha_3^{(1)} = -3,75^\circ$ ;  $\alpha_4^{(1)} = +11,25^\circ$ . Як впливає з табл. 3.5, завдяки роботі за цим двокаскадним схемам перетворення компенсуються всі ВГ, крім 23 25;

- 48-фазний в межах тих ж шин 10 кВ завдяки тому, що відносний поворот векторів струму основної частоти для непарної пари трансформаторів і парної пари складає  $\alpha_1^{(1)} = 7,5^\circ$ .

Векторна діаграма струмів в мережевих обмотках чотирьох перетворювачів показано на рисунку 3.5.

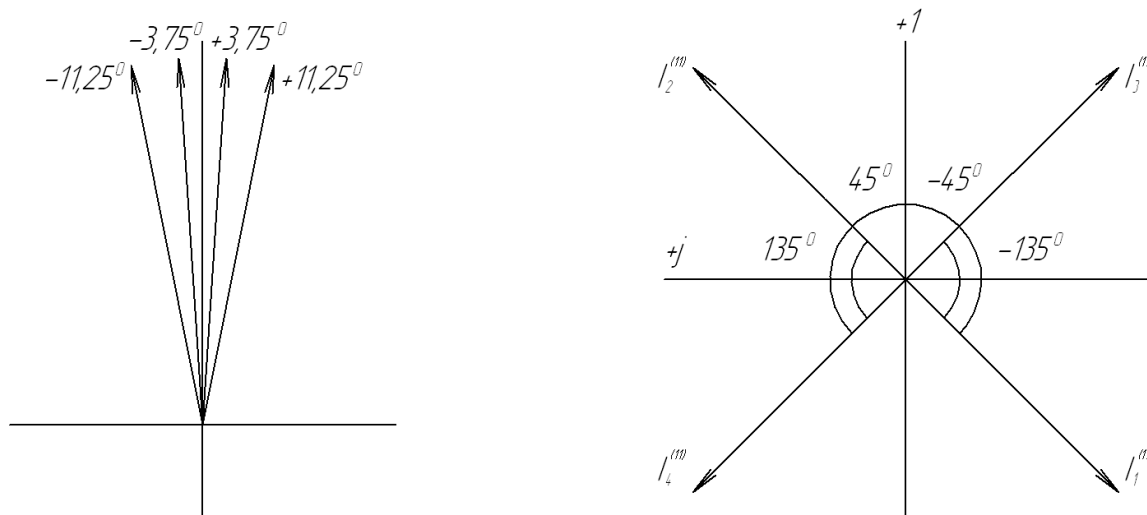


Рисунок 3.5 – Векторна діаграма струмів основної частоти та 11-ої гармоніки при 48-фазній схемою перетворення

Значення кутів  $\alpha_{1-4}^{(n)}$  для всіх непарних гармонік на шинах 10 кВ наведено у табл. 3. Коефіцієнт некомпенсації ВГ  $k_{ВГ} = 0$  для  $n = 11, 13, 35$  і  $37$ , то є вони повністю компенсуються, будучи в протифазі на виході мережевих обмоток трансформаторів перетворювачів 1-2 і 3-4, роботаючих з  $\alpha^{(1)} = 15^\circ$  (24-фазний режим). Такий же ефект спостерігається для гармонік  $n = 23$  і  $25$ , але завдяки тому, що  $\alpha^{(1)} = 7,5^\circ$  для пар перетворювачів 1-4 і 2-3, працюючих в 48-фазний режим.

Таблиця 3.6 - Фазові кути гармонік струму при 48-фазній схемою перетворення

$\alpha$	Порядок гармонік											
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
$\alpha_1^{(n)}$	-68	68	-140	140	-201	201	-265	265	-335	335	-45,5	45,5
$\alpha_2^{(n)}$	21	-21	45,5	-45,5	68	-68	90,5	-90,5	115	-115	140	-140
$\alpha_3^{(n)}$	-21	21	-45,5	45,5	-68	68	-90,5	90,5	-115	115	-140	140
$\alpha_4^{(n)}$	68	-68	140	-140	201	-201	265	-265	335	-335	45,5	-45,5
$k_{BG}$	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-

Ефективність результуючої компенсації на шинах 10 кВ КПП що складається з чотирьох перетворювачів при трикаскадній системі компенсації, наведена в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Ефективність результуючої компенсації при 48-фазній схемі

Схема перетворення	$k_{BG}$											
	Порядок гармонік											
	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
12- фазна	0	0			0	0			0	0		
24- фазна			0	0							0	0
48- фазна							0	0				

Значення по економічним втрат викликаних перервами електропостачання для різних галузей виробництва суттєво відрізняються, і споживач має право подавати позовні вимоги в електропостачальні компанії ґрунтуючись на розрахунках збитків, отриманих від простоїв і втраченої вигоди.

Показані раніше таблиці і значення збитків від струмів вищих гармонік і напруги, і методи розрахунків кожного можливих значення збитків, які можна пред'явити електропостачальній компанії. При цьому, багатьма значеннями шкоди нехтують. Тому потрібно встановлення індикатора, з вказівником на певний вигляд шкоди. Роль індикатора може грати температура самого нагрітого вузла ізоляції.

Для всіх типів електроустановок вказуються максимальні показники

тривало допустимої температури ізоляції в нагрітому вузлі при тривалих перевантаженнях. З обліком чинного значення температури максимально нагрітій точці ізоляції більшість збитків відносяться до трьох основних груп з обліком їх походження.

При середньому розрахунку річного навантаження, втрати від вищих гармонік струму коштуватимуть підприємству 45000 грн/рік. З отриманих результатів слід, що більшість втрат приходять на кабельні лінії, т.к. найчастіше найзавантаженіші та залежність втрат активної потужності має пряме значення від гармонік вищого ладу. Розраховано, що збитки від наявності вищих гармонік струму в мережі залежить від коефіцієнта завантаження електроустановки в режимах мінімуму і максимуму навантажень, тривалістю піковий навантаження, характеру гармонік струму навантаження, середньодобової температури довкілля, ціною електроустановки. Для перерахованих типів знайдені їх значення впливу на розмір шкоди.

### **Висновки по третьому розділу**

У даному розділі були розглянуті методи та засоби зниження впливу нелінійного навантаження у мережах 6-10кВ. Виявлено переваги та недоліки кожного з методів.

## **ВИСНОВКИ**

На сьогоднішній день відомі десятки розробок, практичні результати яких підтверджують забезпечення необхідних показників функціонування систем електропостачання і якості електричної енергії на рівні ДСТУ 3466-96.

Терміни та визначення.. У другому розділі були розглянуті методи та засоби зниження впливу нелінійного навантаження у мережах 6-10кВ. Виявлено переваги та недоліки кожного з методів.

Ефективність компенсації ВГ тільки за рахунок застосування багатофазних схем перетворення (без застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв) досить висока. Це дозволяє в багатьох випадках суттєво знизити рівні спотворень, внесених потужними перетворювачами, як у вузлах енергосистеми, так і на шинах самих підприємств.

У реальних електричних мережах ступеня компенсації будуть декілька відрізнятися від розрахункових, що обумовлено відмінністю параметрів електроустановок від ідеальних, а також різноманітністю режимів їх роботи.

Застосування пристроїв компенсації реактивною потужності і придушення вищих гармонік в розподільчих мережах необхідно і доцільно. Однак це наводить до значних фінансових витрат.

Тому вибір методів та засобів зниження впливу на живильну мережу споживачів з нелінійним навантаженням залежить не тільки від техніко-економічного стану мережі, але і від готовності власників мереж вкладати в їх розвиток і удосконалення.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1.В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс Силова перетворювальна техніка// НТТУ «КПІ» імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО// Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського,- 2022-340 с.

2. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. Т.1. Елементна база електронних пристроїв / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. – К.: ТОВ "Видавництво"Обереги", 2000.– 300с.
3. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія / Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 300 с.
4. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. – Київ, 2019. – 241 с.
5. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Промислова електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги у постійну: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 342 с.
6. Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Островерхов М.Я., М.С. Махмуд АльСуод. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричних кіл: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 462 с.
7. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка"/ А.А. Щерба, К.К. Побєдаш, В.А. Святненко: – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. — 360 с. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>.
8. Побєдаш К.К., Святненко В.А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії [Електронний ресурс]: навчальний посібник/ Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2017. – 244 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19823>.
9. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник / В.С. Руденко В.Я. Ромашко, В.В. Трифонюк.– Київ, Либідь, 1993, – 432 с
10. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.
11. ДСТУ 2815-94 Електричні та магнітні кола та пристрої.
12. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. М.: Инфра-М, 2014. 136 с.

13. Р.А. Александрук, В.Я. Головачук, С.В. Копил Надійність електропостачання та засоби для підвищення її рівня Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 27-28 листопада 2019.

14. 2.Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електропостачання: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. – 324 с.

15. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник / Шестеренко В.Є. — Вінниця: Нова Книга, 2011. — 656 с

16. Постанова НКРЕКП №312 від 14.03.2018. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=31833>.

17. Постанови Кабінету Міністрів України № 1077 від 16.12.2015р. «Про захист прав споживачів».

18. Постанова 12.06.2018 № 375 «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання». /Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

19. ДСТУ 3466-96 Якість електроенергії. Терміни та визначення.