

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет  
Кафедра електричної інженерії

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження способів підвищення якості електроенергії в системах електропостачання металургійних виробництв в умовах підстанції КРЗ-8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»»

*КНУ.МР.141.24.779-07*

Виконав студент II курсу, групи СЕП-23м \_\_\_\_\_/Євгеній ЛИЧКО/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних

об'єктів»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Завідувач кафедри,  
д.т.н., професор

\_\_\_\_\_/Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/Олексій МИХАЙЛЕНКО/

Керівник:  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/Олексій МИХАЙЛЕНКО/

Кривий Ріг  
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *магістр*

Спеціальність: *141 - Електроенергетика, електротехніка та  
Електромеханіка*

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Личку Євгенію Юрійовичу*  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Дослідження способів підвищення якості електроенергії в системах електропостачання металургійних виробництв в умовах підстанції КРЗ-8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

1. Термін подання студентом роботи: 06 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: *Метою є вибір найоптимальнішого методу фільтрації гармонічних спотворень. Завданням є аналіз та дослідження існуючих та можливих рішень для покращення якості електроенергії в мережі 6 кВ підстанції КРЗ-8*
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):  
*I. Якість електричної енергії систем електропостачання металургійних виробництв; II. Покращення якості електроенергії методом фільтрації; III. Дослідження способів підвищення якості електроенергії підстанції КРЗ-8.*
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): *I. Лінія збірних шин №3 підстанції КРЗ-8; II. Імітаційні моделі фільтрів у програмному пакеті Simulink MATLAB; III. Форми напруги в мережі з нелінійним навантаженням до та після підключення пристроїв фільтрації гармонік.*

5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Михайленко О.Ю.	26.09.2024/	26.09.2024/
II	Михайленко О.Ю.	09.10.2024/	09.10.2024/
III	Михайленко О.Ю.	22.10.2024/	22.10.2024/

6. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін
1.	Визначення мети, об'єкту, предмету дослідження.	04.09.2024 – 06.09.2024
2.	Визначення попередньої структури роботи	09.09.2024 – 13.09.2024
3.	Збір даних в умовах підстанції	16.09.2024 – 25.09.2024
4.	Огляд літературних джерел та робота над першим розділом	26.09.2024 – 08.10.2024
5.	Аналіз наявної інформації та робота над другим розділом	09.10.2024 – 21.10.2024
6.	Проведення експериментальних досліджень та робота над третім розділом	22.10.2024 – 04.11.2024
7.	Підготовка повного тексту пояснювальної записки, оформлення реферату та презентації	05.11.2024 – 17.11.2024
8.	Проходження перевірки на плагіат та рецензування	18.11.2024 – 06.12.2024

Дата видання завдання 04.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Євгеній ЛИЧКО**

(ПІ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Олексій МИХАЙЛЕНКО**

(ПІ)

## АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему:  
«Дослідження способів підвищення якості електроенергії в системах  
електропостачання металургійних виробництв в умовах підстанції КРЗ-8  
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»»

***КНУ.МР.141. 24.779-07***

50 с., 17 рис., 1 табл., 15 літературних джерел.

Об'єкт розробки – система електропостачання металургійних виробництв.

У загальній частині розглянуті проблеми сучасної електроенергетики, які впливають на якість електроенергії, вивчені нормативні показники якості. В умовах підстанції КРЗ-8 був проведений аналіз спотворень, що присутні у мережі під впливом споживачів з нелінійними характеристиками струму. Особливу увагу надано огляду показників, що застосовуються для аналізу гармонічних спотворень. Також був досліджений вплив відхилень якості на роботу електрообладнання, та розглянуті основні способи зменшення цього впливу.

У теоретичній частині розглянуті сучасні засоби фільтрації гармонік, проаналізована робота фільтрокомпенсуючих пристроїв підстанції КРЗ-8. Застосоване у пристрої ступеневе регулювання є відносно простим, але має обмеження щодо гнучкості, швидкості реакції та точності, що може знижувати ефективність його застосування. Також здійснено загальне порівняння активних, пасивних та гібридних фільтрів, відзначені їхні переваги та недоліки, розглянута можливість їхнього застосування в мережі підстанції.

У аналітично-дослідницькій частині були проаналізовані можливі відхилення параметрів фільтрів із-за технології виробництва і впливу навколишніх факторів. Досліджено, що ця величина досягає 12 %. Зміна частоти мережі на 8 % погіршує якість налаштувань фільтра. На основі вимірювань було проведено корекцію цих налаштувань. Також була побудована модель керування ФКП КРЗ-8, проведена оцінка якості фільтрації струму. Розглянута модель АФ, її структура, параметри, алгоритм роботи, проведено її моделювання у мережі з нелінійним навантаженням. Дана модель показала свою ефективність у боротьбі з гармонічними спотвореннями. На основі структур паралельної та послідовної САФ побудовані імітаційні моделі гібридних ФКП. ГФ на основі паралельного АФ показало більшу ефективність з компенсації реактивної потужності. Результати моделювання підтвердили ефективність поєднання систем активної та пасивної фільтрації, які у 2 рази знижують рівень гармонік.

## КЛЮЧОВІ СЛОВА

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, СПОТВОРЕННЯ, ГАРМОНІКИ, ФІЛЬТР

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	10
1.1. Проблеми якості електроенергії сучасної електроенергетики.....	10
1.2. Аналіз показників якості та спотворень електроенергії в умовах підстанції КРЗ-8.....	11
1.3. Показники гармонічних спотворень розподільчих мереж 6 кВ.....	15
1.4. Вплив якості електроенергії на роботу мереж і електрообладнання.....	16
1.5. Заходи з підвищення якості електроенергії.....	19
Висновки до 1 розділу.....	20
РОЗДІЛ 2. ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ ФІЛЬТРАЦІЇ.....	21
2.1. Сучасні методи фільтрації електроенергії.....	21
2.2. Огляд фільтрокомпенсуючого пристрою КРЗ-8.....	23
2.3. Робота активних фільтрів у системах з конденсаторними установками.....	25
2.4. Порівняльний аналіз пасивних, активних та гібридних фільтрів гармонік струму.....	26
Висновки до 2 розділу.....	29
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІДСТАНЦІЇ КРЗ-8.....	30
3.1. Дослідження несинусоїдних режимів системи електропостачання.....	30
3.2. Корекція фільтрації гармонік ФКП підстанції.....	35
3.3. Модель активного фільтра для корекції гармонік.....	36

3.4. Розробка імітаційної моделі гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв на основі паралельного та послідовного активних фільтрів.....	40
Висновки до 3 розділу.....	45
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ЯЕ – якість електроенергії;  
ПЯЕ – показники якості електроенергії;  
ЕРС – електрорушійна сила;  
АД – асинхронний двигун;  
ЛЕП – лінії електропередач;  
КРП – комплектно-розподільчий пристрій;  
ЕМС – електромагнітна сумісність;  
РПН – регулювання напруги під навантаженням;  
АВР – автоматичне введення резерву;  
АРВ – автоматичне регулювання напруги (в генераторах);  
КЗ – коротке замикання;  
ФКП – фільтрокомпенсувальні пристрої;  
ФКУ – фільтрокомпенсувальна установка;  
КП – компенсувальний пристрій;  
ЧРП - частотно-регульовані перетворювачі;  
ВГС - вищі гармонічні складові;  
АФ – активний фільтр;  
САФ – силовий активний фільтр;  
ПФ – пасивний фільтр;  
ГФ – гібридний фільтр;  
ККД – коефіцієнт корисної дії;  
КВ - керований випрямляч.



## ВСТУП

Бурхливий розвиток електротехнічної галузі зумовив появу обладнання та пристроїв, котрі потребують іншої якості електроенергії, відмінної від тої, яку можуть забезпечити фізично та морально застарілі системи електроживлення побутових та промислових мереж, є більш потужними, та мають суттєвий вплив на ці мережі.

Зростання кількості споживачів із нелінійними характеристиками навантаження, а також збільшення струмів вищих гармонік в електромережах викликає суттєве спотворення синусоїдальної форми напруги. Це, своєю чергою, провокує аварійне спрацьовування захисних систем електромереж, підгорання нульових проводів, втрату якості ізоляції, пошкодження силового електрообладнання, електронної техніки та пов'язаних з нею систем управління, суттєво впливає на роботу сучасних освітлювальних пристроїв, торкається економічної складової, пов'язаної з надмірним споживанням електроенергії та амортизаційними відрахунками.

Останнім часом багато уваги до проблеми якості електроенергії почали надавати не тільки її виробники та споживачі, а й дослідники. Зниження ЯЕ є наслідком перехідних процесів, пов'язаних зі зміною параметрів напруги, а також зі сталими режимами, наприклад, несиметрія, гармоніки [1].

Таким чином, наразі доволі актуальним є аналіз причин спотворень, їхнього впливу на якість електроенергії, а також пошук сучасних методів зменшення несинусоїдальності напруги та забезпечення електромагнітної сумісності споживачів.

# РОЗДІЛ 1

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

### 1.1. Проблеми якості електроенергії сучасної електроенергетики

Проблема якості електроенергії (ЯЕ) належить до числа найважливіших завдань сучасної електроенергетики. Суть цієї проблеми здебільшого зводиться до такого: оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС), джерел електромагнітних завад і навантажень, оцінки економічних збитків, що виникають через це, визначення рівня електромагнітних завад, які створюються різними проблемними навантаженнями, прогнозування їх величин у вузлах систем електропостачання, а також зменшення рівнів завад до допустимих стандартами значень [10].

Діапазони змін показників якості електроенергії на підприємствах різних галузей зазвичай значні та в багатьох випадках перевищують допустимі норми, встановлені відповідними стандартами, наприклад, ДСТУ EN 50160:2014 [3]. Згідно даного стандарту, для ПЯЕ встановлені такі гранично допустимі значення: відхилення напруги повинно бути в межах  $\pm 10\%$ , несиметрія напруги – до 4%, тривалість провалу напруги – до 30 секунд, відхилення частоти – до  $\pm 0,4$ , тривалий показник флікера – до 1 відн. од., коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги – до 8% в мережі 0,4 кВ, та до 5% в мережі 6-20 кВ.

Зростання потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень, навіть у розвинених країнах, випереджає впровадження заходів для зменшення електромагнітних завад. Економічний збиток, пов'язаний із низькою ЯЕ, має електромагнітну та технологічну складові. Електромагнітна складова визначається збільшенням втрат активної потужності й скороченням терміну служби ізоляції обладнання. Технологічна складова збитку зумовлена впливом ЯЕ на продуктивність технологічних установок,

собівартість продукції та можливістю часткової або повної зупинки виробництва.

Втрати електроенергії через її низьку якість можуть досягати 15-20%. Відносні втрати електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн, згідно з усередненими даними за 2015-2020 роки, становлять 4-7%, тоді як втрати в мережах України перевищують ці значення в 1.5-2.5 рази. Це свідчить про залежність рівня втрат електроенергії від економічного рівня держави.

У країнах із розвинутою економікою зазвичай вища технічна культура виробництва, передачі й розподілу електроенергії. Там застосовують сучасні системи управління режимами роботи мереж, контролю та обліку електроенергії, а також діють платоспроможні й дисципліновані споживачі. Такі країни мають чітку нормативно-правову базу та ефективну систему тарифного регулювання [10].

## **1.2. Аналіз показників якості та спотворень електроенергії в умовах підстанції КРЗ-8**

Підстанція КРЗ-8 Цеху мереж та підстанцій розташована на території ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та призначена для електрозабезпечення дільниць цехів прокатного та ремонтного виробництв. Живиться підстанція від двох незалежних ЛЕП 154 кВ, з підстанцій підприємства «Гірнична-330» та «Південна-330».

Основними агрегатами підстанції є два силові трьохобмоточні трансформатори типу ТРДН-3200/150, по дві вторинні обмотки яких живлять лінії збірних шин 6 кВ комплектного розподільчого пристрою (КРП) п/ст. Система автоматичного вводу резерву (АВР) забезпечує резервацію між лініями трансформаторів. На рис. 1.1 зображена 3 лінія збірних шин, яку живить один з двох трансформаторів.

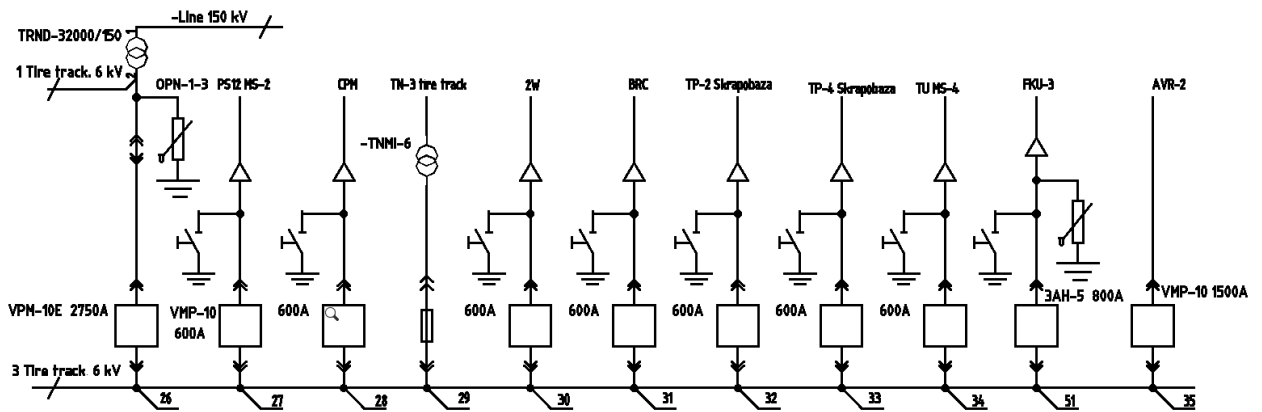


Рис. 1.1. Споживачі 3 лінії збірних шин підстанції КРЗ-8

Наразі підстанція не працює на повну потужність з причин зупинки деяких виробництв, обмежень у електроспоживанні та тимчасовою економічною недоцільністю роботи (Проволочний стан №1). Рівень навантажень підстанції у «найкращі часи» стабільно тримався у районі 11-16 МВА, зараз – до 5 МВА.

Найбільш задіяною на даний момент з чотирьох ліній збірних шин є третя, тому для подальших досліджень обираємо саме її. Лінія має у своєму складі споживачів:

- підстанція ПС12 дрібносортового стану №2 Сортопрокатного цеху №1 (СПЦ №1);
- підстанція 2В Вольцетокарного цеху (ВТЦ);
- підстанція БРЦ Ремонтно-механічного цеху (РМЦ).
- Підстанції ТП-2 та ТП-4 Скрапобаз.

ВТЦ та РМЦ мають станки з числовим програмним управлінням, до складу яких входять електронні елементи, що вносять спотворення до мережі; прокатний стан характеризується різкозмінним навантаженням та великою кількістю електродвигунів та систем керування, наприклад, тиристорні перетворювачі є основним джерелом вищих гармонік струму. Окрім цього, майже у всіх цехах реалізований перехід на освітлення світлодіодними світильниками.

Наявність даних споживачів з нелінійними, потужними та різко змінними навантаженнями говорить про те, що на підстанції доцільно проводити аналіз змін показників якості та спотворень електроенергії. Розглянемо їх.

Розрізняють основні і додаткові показники якості електроенергії. « До основних показників відносять: усталене відхилення напруги  $\delta U_y$ ; розмах зміни напруги  $\delta U_t$ ; доза флікера  $P_t$ ; коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ; коефіцієнт  $n$ -ї гармонічної складової напруги  $K_U(n)$ ; коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю  $K_{2U}$ ; коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю  $K_{0U}$ ; відхилення частоти  $\Delta f$ ; тривалість провалу напруги  $\Delta t_p$ ; імпульсна напруга  $U_{\text{імп}}$ ; коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер}U}$ . До додаткових показників якості електроенергії відносять: частоту повторення зміни напруги  $F\delta U_t$ ; інтервал між змінами напруги  $\Delta t_{i,i+1}$ ; глибину провалу напруги  $\delta U_p$ ; частість появи провалів напруги  $F_p$ ; тривалість імпульсу за рівнем 0.5 його амплітуди  $t_{\text{імп}0,5}$ ; тривалість тимчасової перенапруги  $\Delta t_{\text{пер}U}$  » [4].

Розглянемо групу сталих спотворень якості, до якої належать гармонічні спотворення, несиметрія та флікер.

Гармонічні спотворення — це відхилення форми хвилі напруги або струму від ідеальної синусоїдальної. Їх викликають споживачі з нелінійним навантаженням. Наявність в мережі даних відхилень впливає на роботу інших споживачів, саме тому виникає потреба в їх фільтрації або ж компенсації, застосування даних заходів корегує форму синусоїди.

Гармонічні складові напруги з коефіцієнтом понад 5% несуть небезпеку для обладнання. Такі спотворення виникають через коротке замикання під час комутації струму в діодах і тиристорах випрямлячів, що створює провали напруги та вищі гармонійні складові [5].

Флікер — це швидкі коливання напруги, які спричиняють миготіння світла чи порушення роботи електронного обладнання. Причиною зазвичай є великі навантаження, що вмикаються чи вимикаються.

Несиметрія фаз трапляється у багатофазних системах через дисбаланс між фазами. Це збільшує втрати та погіршує роботу асинхронних двигунів.

Проведемо огляд спотворень, які не є сталими.

Зникненням напруги вважається відсутність напруги в мережі понад 40 мілісекунд, впродовж двох відрізків часу.

Зниження рівня напруги на 10 % за час від 10 мс до кількох секунд зазвичай спричинене увімкненням енергоємного обладнання, запуском двигунів або роботою зварювальних апаратів.

Відхилення напруги — це довготривале зниження чи підвищення напруги через зростання споживання енергії або недостатню потужність джерела.

Тимчасове перенапруга — це короткочасне перевищення напруги понад 110% номіналу тривалістю 1000-5000 мкс. Його викликають комутаційні процеси чи іскріння апаратів.

Стрибок напруги— це короткочасне збільшення рівня напруги в електромережі у декілька разів, яке зазвичай триває до 50 мілісекунд у результаті перемикаць потужного обладнання, роботи імпульсних пристроїв, електромагнітних перешкод, аварій.

Електромагнітні перешкоди — це високочастотні імпульси, що накладаються на напругу. Вони є результатом впливу на мережу комутаційних пристроїв, електромагнітного обладнання, магнітних явищ.

Частота в електричній мережі є ключовим параметром, який відображає баланс між виробництвом та споживанням електроенергії. Зміна частоти виникає через порушення цього балансу. Причинами відхилень також є: раптові зміни в навантаженні, нестабільність генерації, аварійні режими в енергосистемі, недостатня інерційна стабілізація, збої в роботі систем автоматичного регулювання частоти.

Окрім цих спотворень, якість електроенергії також визначають коефіцієнти форми та амплітуди кривих, гармонічні резонанси, джерела гармонік напруги та струму.

### 1.3. Показники гармонічних спотворень розподільчих мереж 6 кВ

Для підстанцій з напругою розподілення 6 кВ параметри гармонічних спотворень визначаються нормативами ДСТУ EN 61000-6. Ці нормативи встановлюють допустимі рівні гармонік для забезпечення належної якості електроенергії. Основними показниками, що застосовуються для аналізу рівня гармонічних спотворень, є наступні [6]:

1. Загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD, Total Harmonic Distortion). Він представляє співвідношення суми гармонік до основної гармоніки. Для напруги цей показник не повинен перевищувати 5%, для струму – 8%. Високі значення THD свідчать про значну присутність гармонік, що впливають на ефективність роботи обладнання. Реальні значення THD для напруги становлять від 3% до 6%, а для струму – від 10% до 20%, залежно від типу навантаження.
2. Індивідуальні гармонічні складові. Для окремих гармонік нормативи встановлюють такі обмеження: третя гармоніка – не більше 3% від основної, п'ята – до 4%, сьома – не більше 3%. Гармоніки вищих порядків мають ще менші значення, щоб уникнути резонансів або перевантаження обладнання. Міжгармоніки, тобто частоти, які не є кратними основній, не повинні перевищувати 0,2% від базового значення.
3. Коефіцієнт асиметрії за зворотною послідовністю. Цей параметр демонструє вплив гармонік на симетрію трифазної системи. Допустиме значення – до 2%, однак у реальних умовах на металургійних підприємствах цей показник може сягати 2–5% через нерівномірність навантаження.
4. Коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю. Він оцінює гармоніки нульової послідовності, що виникають через непарні гармоніки (наприклад, третя, дев'ята). Його значення повинно бути меншим за 1%.
5. Сумарний коефіцієнт деформації (TDD, Total Demand Distortion). Цей показник враховує струмові спотворення з огляду на навантаження в системі

і не має перевищувати 10%. Особливо важливо це для умов змінного навантаження.

Високий рівень гармонік може спричиняти перегрів обладнання, зменшення його ресурсу або погіршення стабільності мережі. Зазвичай найбільший внесок у спотворення роблять низькі гармоніки. Так, третя гармоніка може досягати 5–10%, п'ята – 2–5%, сьома – 2–4%. Гармоніки вищих порядків (11, 13, 17) мають рівень до 2%, а міжгармоніки можуть становити до 0,5–2%.

Гармонічні спотворення можуть бути постійними або з'являтися в пікові моменти, коли в мережу підключаються потужні споживачі. Для забезпечення стабільності електромережі часто використовуються фільтри або інші коригувальні пристрої, що дозволяють зменшити вплив гармонік.

#### **1.4. Вплив якості електроенергії на роботу мереж і електрообладнання**

Проблеми з якістю електроенергії можуть призвести до низки серйозних наслідків: збільшення втрат енергії в мережах; перегрів електродвигунів та електричних машин, що призводить до прискореного старіння ізоляції та підвищує ймовірність аварій через однофазні короткі замикання, що можуть переходити в багатofазні; зростання споживаної електричної потужності; відмови автоматики та помилкові спрацьовування релейного захисту; збої в роботі електроніки керування і обчислювальних систем; перешкоди в роботі радіоустаткування; некоректне функціонування електролічильників.

Відхилення напруги, спричинені повільними змінами навантаження в системі, впливають на роботу окремих споживачів по-різному. Наприклад, тривале підвищення напруги на затискачах електричних двигунів, які є основними споживачами енергосистем, може призвести до зростання обертового моменту, зменшення ковзання та збільшення втрат в сталевих



частинах двигунів, оскільки втрати залежать від квадрата підведеної напруги. Це також призводить до збільшення струму холостого ходу та зниження коефіцієнта потужності електродвигунів.

Найбільший вплив на роботу обладнання має відхилення напруги, особливо для нагрівальних та освітлювальних приладів. У електротермічних установках зменшення напруги збільшує час нагріву, а при значних відхиленнях процес може не завершитися.

Збільшення напруги впливає на мережу загалом: зменшуються втрати потужності в лініях, але збільшуються втрати в неробочому режимі. У мережах напругою 330 кВ і вище можуть зрости втрати потужності через корону. Підвищення напруги на асинхронному двигуні на 1% може збільшити струм холостого ходу та споживану реактивну потужність на 3%. Водночас це може призвести до генерації вищих гармонік напруги через перехід на нелінійну частину кривої намагнічування двигуна, що також збільшує статичну стійкість вузла навантаження.

Зниження напруги на електродвигунах призводить до зменшення обертового моменту, збільшення ковзання та зростання струму в обмотках статора, що скорочує термін служби ізоляції. Якщо двигун працює при напрузі 90% від номінального значення, це може скоротити строк служби ізоляції на 18-20%.

Частота в мережі залежить від балансу активних потужностей. Якщо цей баланс порушується, частота змінюється. Це може статися через аварійне відключення генераторів або елементів системи, або через включення чи відключення споживачів. Такі зміни призводять до зростання втрат потужностей та зменшення терміну служби обладнання через перегрів ізоляції. При зміні частоти знижується ефективність асинхронних двигунів, оскільки їх конструкція передбачає мінімальні втрати саме при номінальній частоті. Також зміна частоти може призвести до насичення в синхронних генераторах і трансформаторах, що збільшує втрати в сталі та генерує вищі гармоніки.

При зниженні частоти на 1% зростають втрати енергії на передачу на 2%, що зумовлює додаткові витрати. Зміни частоти також можуть викликати перевантаження ліній зв'язку між системами, якщо не врахувати характеристики турбін і систем регулювання.

Нерівномірний розподіл навантаження та несиметричні режими роботи обладнання можуть спричинити несиметрію в мережах, термін служби ізоляції може скоротитися вдвічі через додатковий нагрів. У синхронних двигунах також спостерігаються додаткові втрати потужності, що спричиняє перегрів обмоток збудження та вібрацію ротора.

Несиметрія в мережі може зменшити потужність, яку генерує батарея конденсаторів, і спричинити додаткові втрати в лініях та трансформаторах. Це також може привести до помилкової роботи систем автоматики і релейного захисту, що порушує технологічні процеси.

Вищі гармоніки (наприклад, 3, 5, 7 порядків) спричиняють значні теплові втрати, перевантаження обладнання та додатковий нагрів, тоді як високі гармоніки (11, 13 і більше порядків) можуть викликати високочастотні перешкоди, що впливають на чутливу електроніку і викликають збої в роботі приладів. Субгармоніки (частоти нижчі за основну) можуть призвести до нестабільної роботи обладнання, спричиняючи вібрації та зношення механічних компонентів.

Спотворення напруги 5-ї гармоніки особливо впливає на трифазні двигуни, створюючи негативний крутний момент, що сповільнює їх обертання. Це призводить до надлишку струму, який може викликати перегрів і виведення двигуна з ладу. Тому усунення цієї гармоніки є важливим завданням на промислових об'єктах.

Гармоніки виникають через роботу нелінійних навантажень, таких як тиристорні перетворювачі чи електродугові печі. Вони можуть порушити роботу релейного захисту та протиаварійної автоматики, що веде до порушень технологічних процесів.

Практика показує, що батареї конденсаторів, які працюють при несинусоїдальній напрузі, можуть швидко вийти з ладу через вздуття чи вибухи, оскільки вони піддаються перевантаженню струмами гармонік. Це відбувається через резонансний режим, що може виникнути в мережі на частотах гармонік.

Джерела гармонік включають машини змінного струму, магнітні кола трансформаторів, перетворювачі енергії всіх типів, а також апарати з електричною дугою, такі як зварювальні машини.

Гармоніки можуть спричиняти додаткові втрати в елементах електричної системи, що виявляються в резонансних режимах на підстанціях або в мережі низької напруги. Перед установкою батарей конденсаторів необхідно оцінити можливість виникнення резонансу в системі.

Взаємодія гармонічних складових з ємнісними та індуктивними компонентами мережі може призвести до підсилення певних гармонічних частот, що ускладнює роботу системи.

При виникненні ударного навантаження швидкі зміни напруги в мережі спричиняють коливання, що можуть призвести до флікеру, порушень в роботі телебачення, регулюючих пристроїв і рентгенівського обладнання, а також викликати коливання моменту на валах двигунів. Це, в свою чергу, може призвести до збільшення втрат електроенергії і прискореного зносу матеріалів.

### **1.5. Заходи з підвищення якості електроенергії**

Необхідність вжиття заходів щодо покращення якості електроенергії в мережах часто є наслідком неправильної побудови системи електропостачання. Наприклад, фільтрацію гармонічних спотворень ефективніше здійснювати безпосередньо біля їх джерела виникнення, це має менший вплив на мережу та її споживачів.

Існує три основні групи методів для підвищення якості електроенергії. Перша з них включає раціоналізацію засобів електропостачання: підвищення потужності мережі, живлення нелінійних споживачів підвищеною напругою тощо. Друга група орієнтована на обмеження впливу приймачів на мережу живлення шляхом впливу на самі приймачі. Третя група включає використання пристроїв корекції якості, тобто регуляторів одного чи кількох показників якості електроенергії або відповідних параметрів споживаної потужності.

До третьої групи відносяться наступні методи: використання конденсаторних батарей для компенсації; застосування статичних джерел реактивної потужності; пристрої активної фільтрації; системи компенсації, що складаються з кількох з перерахованих пристроїв, які працюють паралельно.

### **Висновки до 1 розділу**

У 1 розділі розглянуті проблеми сучасної електроенергетики, які впливають на ЯЕ, вивчені нормативні показники якості. В умовах підстанції КРЗ-8 був проведений аналіз спотворень, що присутні у мережі під впливом споживачів з нелінійними характеристиками струму. Особливу увагу надано огляду показників, що застосовуються для аналізу гармонічних спотворень. Також був досліджений вплив відхилень якості на роботу електрообладнання, та розглянуті основні способи зменшення цього впливу.

## РОЗДІЛ 2

# ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ ФІЛЬТРАЦІЇ

### 2.1. Сучасні методи фільтрації електроенергії

Сучасні методи фільтрації електроенергії спрямовані на зменшення спотворень напруги та струму, а також на забезпечення стабільної та надійної роботи електричного обладнання. Ці методи допомагають поліпшити якість електроенергії, зокрема зменшити гармонічні спотворення, імпульсні перенапруги та інші види електромагнітних завад.

Основні сучасні методи фільтрації електроенергії [8]:

#### 1. Пасивні фільтри:

- LC-фільтри (індуктивно-конденсаторні) служать для придушення гармонік на певних частотах.
- фільтри нижніх частот використовуються для зменшення високочастотних гармонік, які виникають у системах через нелінійні навантаження.

2. Активні гармонічні фільтри використовують електронні компоненти, такі як транзистори і операційні підсилювачі, для створення протилежного за фазою сигналу гармонік, який компенсує небажані гармонічні складові. Це дає змогу динамічно відстежувати зміни навантаження та коригувати гармонічні спотворення в режимі реального часу.

3. Активні компенсатори реактивної потужності (STATCOM) застосовуються у високовольтних системах передачі електроенергії (110 кВ і вище). Основний акцент — стабілізація напруги та підтримка реактивної потужності в масштабах всієї системи передачі. Використовується для локальних завдань, таких як корекція коефіцієнта потужності, компенсація провалів напруги, покращення якості електроенергії в локальних мережах [9].

4. Динамічні фільтри (DSTATCOM) використовуються для стабілізації напруги в магістральних мережах, компенсації реактивної потужності та покращення стійкості системи. Призначений для компенсації реактивної потужності на рівні споживачів, балансування навантаження та зменшення гармонік. Працює в низьковольтних і середньовольтних мережах (до 33 кВ). Зазвичай використовується на підстанціях або ключових вузлах енергосистеми. Часто застосовується в промислових чи міських мережах для обслуговування окремих споживачів [9].

5. Активно-пасивні фільтри - це поєднання активних і пасивних елементів для створення більш гнучких і ефективних систем фільтрації. Пасивна частина таких фільтрів забезпечує базове придушення гармонік, тоді як активна частина динамічно компенсує решту спотворень.

6. Фільтри з компенсацією імпульсних завад: використовуються для захисту обладнання від імпульсних перенапруг і високочастотних завад, що можуть виникати через комутаційні процеси або удари блискавки. Такі фільтри часто встановлюються в мережах критичного живлення (серверні центри, медичне обладнання), щоб забезпечити стабільне електроживлення навіть у несприятливих умовах.

7. Фільтри для джерел безперебійного живлення (UPS): багато сучасних UPS оснащені внутрішніми системами фільтрації для забезпечення чистої синусоїдальної напруги на виході, навіть при використанні батарей або генераторів.

8. Резонансні фільтри: ці фільтри налаштовані на певну гармонічну частоту і використовують резонанс для поглинання або зменшення амплітуди гармоніки. Вони ефективні для вузькосмугових гармонічних спотворень.

9. Ізольовані трансформатори з фільтрами: такі трансформатори мають фільтри, які блокують високочастотні гармоніки і знижують рівень електромагнітних завад (EMI). Це забезпечує захист чутливих до завад приладів та систем.

Сучасні дослідження спрямовані на створення нових типів активних фільтрів, що використовують штучний інтелект та машинне навчання для автоматичного налаштування на змінні параметри мережі, що дозволяє адаптувати фільтрацію до реальних умов роботи. Ці методи значно підвищують якість електроенергії та допомагають зменшити вплив спотворень на сучасні електронні системи.

## 2.2. Огляд фільтрокомпенсуючого пристрою КРЗ-8

Велику частку в обсязі сумарних навантажень підстанції КРЗ-8 займають різкозмінні та нелінійні навантаження з підвищеним споживанням реактивної потужності. Для компенсації реактивної потужності з метою зниження втрат енергії та поліпшення ефективності роботи електричних систем, а також забезпечення необхідної якості електричної енергії при різкозмінному навантаженні, а також зменшення несиметрії і несинусоїдності форми кривих струму і напруги використані спеціальні фільтрокомпенсуювальні пристрої (ФКП). Такі пристрої забезпечують фільтрацію вищих гармонік у входній мережі і симетрію напруги по фазах (рис. 2.1).

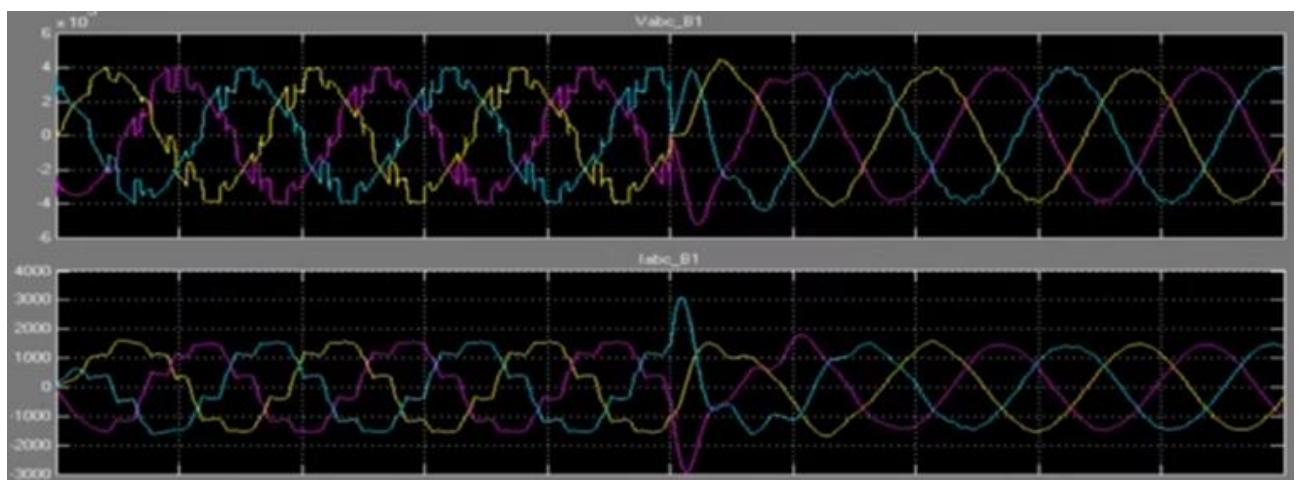


Рис.2.1. Зміна показників напруги і струму в мережі після підключення ФКП

На рис. 2.2 зображена схема ФКП, що реалізована на підстанції.

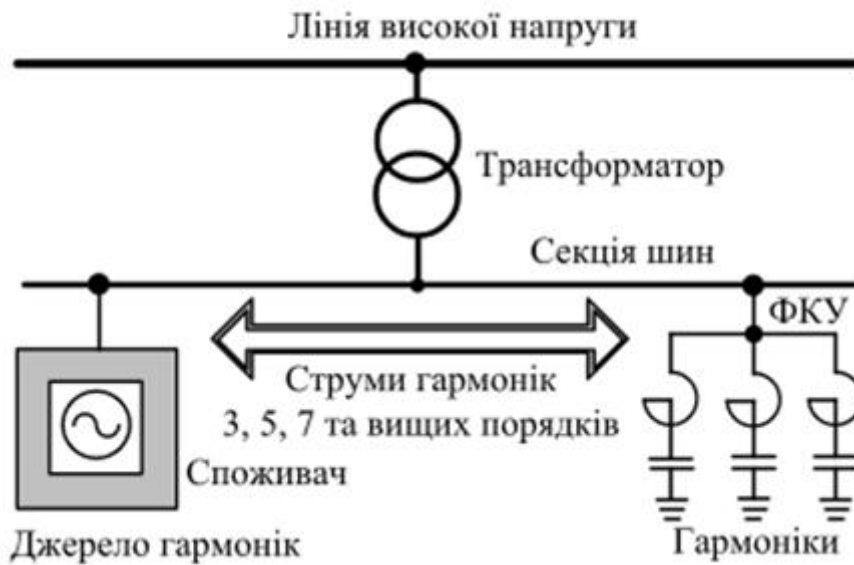


Рис. 2.2. Схема ФКП КРЗ-8

Фільтро-компенсуючі пристрої, що встановлені на підстанції є автоматично керованими. Блок управління в автоматичному режимі, на основі інформації про рівень навантаження, обирає необхідний рівень корекції, саме тому мінімізуються випадки недостатньої або ж надмірної компенсації, що є характерними для некерованих систем. ФКП знижує вплив реактивної складової на мережу та обладнання підстанції, зменшуючи нагрівання кабелів та трансформаторів, знижує втрати енергії, підтримуючи коефіцієнт потужності на рівні, наближеному до 1.

Чому ж є доцільним застосування даної установки в мережі напругою 6 кВ. Вона є ефективною для вузького спектру гармонік, зокрема, більш виражених для високовольтних споживачів 3, 5 і 7 гармонік, тоді як гармоніки більш вищих порядків присутні у низьковольтних мережах.

Ступеневе регулювання, що реалізоване у розглянутому ФКП, є відносно простим, але має обмеження щодо гнучкості, швидкості реакції та точності, що може знижувати ефективність його застосування. Відсутність плавного регулювання може призводити до нерівномірної роботи мережі, особливо в умовах швидких змін навантаження, спричиняти нелінійні



спотворення в електромережі, а також підвищує ризик резонансних явищ, особливо при наявності гармонік. При різких змінах в електричних мережах, реактивна потужність не встигає компенсуватися, через що можливі короточасні перевантаження або недокомпенсація. Підключення і відключення елементів у системі ступеневої компенсації створює додаткове навантаження на комутаційне обладнання, що може знижувати його термін служби. Установка ФКП потребує регулярного обслуговування, особливо конденсаторні батареї, які можуть деградувати з часом. Під час експлуатації може виникнути потреба у заміні елементів, що збільшує загальні витрати. Якщо в системі присутні високі гармоніки, це може спричинити перегрів або навіть пошкодження конденсаторів. Для роботи в умовах гармонічних спотворень можуть бути потрібні додаткові фільтри гармонік, що ускладнить систему.

### **2.3. Робота активних фільтрів у системах з конденсаторними установками**

Активні фільтри (АФ) і конденсаторні установки (зокрема, фільтрокомпенсуючі пристрої) можуть конфліктувати через проблеми, пов'язані з резонансом, але за правильного проектування їх сумісність можлива. Водночас існують випадки, коли їх спільна робота є небажаною або навіть неможливою.

Конденсаторні установки можуть викликати резонанс із реактивними елементами мережі (індуктивністю трансформаторів, ліній тощо), АФ сприймає цей резонанс як підсилені гармоніки і намагається компенсувати їх, що призводить до перевантаження самого фільтра. Конденсаторні установки зазвичай налаштовані на певні гармоніки (5, 7 тощо), створюючи фільтри для них. АФ, працюючи у широкому діапазоні частот, може спробувати компенсувати ті ж самі гармоніки. Це викликає дублювання функцій, створює конфлікт і знижує ефективність обох пристроїв. При спробі

одночасної компенсації гармонік конденсаторними установками і АФ виникають коливання потужності та перерозподіл енергії, що може призвести до нестабільної роботи системи. Активні фільтри компенсують гармоніки, але це може збільшити рівень гармонійного струму, який проходить через конденсатори в установках. У результаті відбувається їх перегрів і зношення.

Як уникнути проблем? Якщо в мережі домінують гармоніки, перевагу слід віддати активним фільтрам, які динамічно реагують на їх зміну. Якщо необхідна компенсація реактивної потужності й гармонік – виникає потреба ретельного налаштування частот фільтрів і параметрів роботи. Для уникнення резонансу конденсаторні установки повинні оснащуватися реакторами, щоб уникнути створення резонансних частот, які збігаються з гармоніками. Також потрібно провести попередній аналіз електричної мережі, щоб оцінити рівень гармонік і можливість виникнення резонансів [11].

#### **2.4. Порівняльний аналіз фільтрів гармонічних спотворень**

Вибір фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП) для мереж 6 кВ з нелінійними та різкозмінними навантаженнями потребує врахування кількох ключових особливостей, щоб забезпечити ефективність роботи мережі та стабільність її параметрів. Зокрема:

1. Потрібно визначити спектр гармонік, рівень їхньої амплітуди та загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD).
2. Для навантажень, що змінюються у великих діапазонах або мають імпульсний характер, важливо врахувати можливість швидкого реагування пристроїв на зміну режимів роботи.
3. Вибір схеми фільтрокомпенсуючого пристрою на основі їх ефективності у боротьбі з гармонічними спотвореннями обраного спектру.

4. Врахування необхідності у забезпеченні підтримки потрібного коефіцієнта потужності ( $\cos \phi$ ) для зниження втрат у мережі та зменшення навантаження на джерела живлення.
5. Важливо запобігти резонансам у мережі, які можуть виникнути через взаємодію фільтрів із параметрами ліній (наприклад, індуктивністю трансформаторів).
6. При виборі номінальної потужності ФКП важливо врахувати фактори впливу високих гармонік на додаткові теплові навантаження обладнання.
7. Перед вибором та впровадженням ФКП необхідно провести моделювання роботи мережі з урахуванням обраного обладнання. Це дозволить оцінити ефективність роботи пристрою та уникнути помилок у проектуванні.
8. Обладнання повинно бути надійним і мати достатній запас міцності для роботи в умовах постійних змін навантаження.
9. Економічна оцінка враховує вартість самого обладнання, монтажу, а також експлуатаційних витрат.

« Вибір номінальних параметрів фільтрових кіл здійснюють, як правило, на підставі робочих характеристик електричної мережі у стаціонарному (усталеному) режимі. Проте досвід експлуатації показав, що такий підхід не завжди забезпечує безаварійну експлуатацію фільтрів, і основна причина полягає у неврахуванні перехідних перенапруг і надструмів під час вибору параметрів фільтрових конденсаторних батарей і реакторів » [14].

При вирішенні завдання компенсації гармонічних спотворень у мережах напругою 6 кВ важливо враховувати специфіку споживачів, параметри мережі та економічні обмеження.

У табл. 2.1. наведено порівняльний аналіз пасивних, активних і гібридних фільтрів гармонік струму на основі досліджень та моделювання.

Табл. 2.1.

## Порівняльний аналіз активних, пасивних та гібридних фільтрів

Тип фільтру	Переваги	Недоліки
АФ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ефективна компенсація гармонік на різних частотах</li> <li>2. Висока точність і стабільність у роботі з динамічними навантаженнями</li> <li>3. Гнучкість та можливість налаштування параметрів</li> <li>4. Швидка адаптація до нових умов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока вартість</li> <li>2. Складна конструкція і вимоги до обслуговування</li> <li>3. Менш ефективні при наявності кількох типів спотворень</li> <li>4. Потреба у значних енергетичних витратах на власне функціонування</li> </ol>
ПФ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота у реалізації</li> <li>2. Економічно найбільш доцільні</li> <li>3. Ефективні у мережі з високовольтними споживачами, які створюють менший спектр гармонійних спотворень</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низька гнучкість, швидкість реакції та точність</li> <li>2. Ефективні лише для певного спектру гармонік (3,5,7)</li> <li>3. Потреба регулярного обслуговування</li> <li>4. Пошкодження конденсаторів від вищих гармонік</li> </ol>
ГФ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ефективні при наявності кількох типів спотворень</li> <li>2. Забезпечують базовий рівень фільтрації навіть за умов відмови активного компонента.</li> <li>3. Краще працюють у мережах із різкими змінами навантаження або при нестабільності параметрів</li> <li>4. Ефективна компенсація гармонік в широкому діапазоні частот</li> <li>5. Менші енергетичні втрати завдяки поєднанню обох типів фільтрів</li> <li>6. Більш економічне рішення у порівнянні з повністю активними фільтрами</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Складніша конструкція порівняно з пасивними фільтрами</li> <li>2. Обмежена здатність корекції у порівнянні з повністю активними фільтрами</li> </ol>

Для мережі 6 кВ пасивний фільтр може знизити гармонічні спотворення до THDI  $\approx$  10-15%. Однак для досягнення нормативного рівня (менше 5%) потрібні додаткові заходи або значне збільшення розмірів та вартості фільтра.

АФ здатний забезпечити рівень THDI менше 2-3%, що перевищує нормативні вимоги. Однак для компенсації гармонік струму навантаження 2 МВАр його потужність повинна становити 25-30% від загального навантаження, що суттєво збільшує витрати.

Гібридна система може знизити THDI до 2-4% при значно меншій потужності активного модуля (10-15% від загального навантаження). Це дозволяє суттєво зменшити вартість обладнання порівняно з чисто активним фільтром, зберігаючи високу ефективність.

Отже, активні фільтри доцільніше використовувати у випадках, коли потрібна висока гнучкість і точність компенсації гармонік у системах із динамічними навантаженнями або частими змінами параметрів. Гібридні фільтри краще підходять для складних промислових мереж із численними нелінійними навантаженнями, де потрібна комплексна компенсація гармонік, реактивної потужності та інших спотворень при мінімальному енергоспоживанні, тому гібридні фільтри є оптимальнішим рішенням.

## **Висновки до 2 розділу**

У даному розділі розглянуті сучасні засоби фільтрації гармонік, проаналізована робота фільтрокомпенсуючих пристроїв підстанції КРЗ-8. Застосоване у пристрої ступеневе регулювання є відносно простим, але має обмеження щодо гнучкості, швидкості реакції та точності, що може знижувати ефективність його застосування. Також здійснено загальне порівняння активних, пасивних та гібридних фільтрів, відзначені їхні переваги та недоліки, розглянута можливість їхнього застосування в мережі підстанції.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІДСТАНЦІЇ КРЗ-8

### 3.1. Дослідження несинусоїдних режимів системи електропостачання

Для аналізу роботи ФКП КРЗ-8 слід враховувати можливі відхилення параметрів фільтрів. Незважаючи на постійне удосконалення технологій виготовлення фільтрів, має місце відхилення параметрів реакторів та конденсаторів від номінальних значень. Наслідком цього є розлаштування роботи фільтрів. Наприклад, залежно від сезонних змін, ємність конденсаторів може змінюватись у межах  $\pm 2\%$  від номінальної. Крім того, пов'язані з технологією виробництва відхилення параметрів оцінюються значеннями  $-5 - 10\%$ . Отже, ймовірним є відхилення до  $12\%$ . Відхилення параметрів реакторів за технологією виробництва є в межах  $\pm 3\%$ .

Окрім змін номінальних параметрів фільтрів, важливим фактором, що впливає на їх роботу, є можливі коливання частоти мережі, зазвичай, до  $\pm 1\%$  [12].

При розгляданні фільтра, налаштованого на певну гармоніку, його відносна резонансна частота обчислюється за формулою 3.1:

$$\square_{рез} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}}$$

(3.1)

З формули очевидно, що резонансна частота є функцією від частоти мережі  $f$ , ємності  $C$  та індуктивності  $L$  фільтра, а будь-які відхилення даних параметрів цю частоту можуть змістити. У підсумку, із-за можливих відхилень частоти мережі, можуть змінюватися налаштування фільтрів в межах від  $6$  до  $8\%$ . До прикладу, для 5-ї гармоніки це відхилення становить від  $4,6$  до  $5,3\%$ , а для 7-ї –  $6,44 - 7,42$ .

У розглянутій схемі КРЗ-8 споживачі живляться від секції шин 6 кВ. Основним навантаженням секції шин 6 кВ є прокатні стани, з їх асинхронними двигунами, навантаженням 0,4 кВ, що живляться від понижувальних трансформаторів, та частотно-регульовані електроприводи, котрі являються джерелом гармонік даної системи. Дані частотно-регульовані приводи з боку мережі живляться від 12-пульсного перетворювача. Теоретичний спектр такого перетворювача – це гармоніки  $(12 \pm 1)$  порядку, однак, такі перетворювачі генерують також 5-ту та 7-му гармоніки.

Сумарна потужність електрообладнання споживачів розглянутої лінії збірних шин №3 - біля 2,8 Мвар. Для компенсації реактивної потужності передбачено компенсувальні пристрої потужністю 6 Мвар (рис.2.2).

З метою дослідження несинусоїдальних режимів даної системи електропостачання виконаємо моделювання її частотних характеристик, з використанням різних схем фільтрокомпенсуючих пристроїв. Під час побудови схеми заміщення системи її нелінійні споживачі виступають у якості джерела струму вищих гармонік, параметри ж інших елементів відповідають їх частотним характеристикам. Схема розглядається окремо для кожної гармоніки методом зведенням опору мережі або її ділянки щодо джерела гармонік [15].

Аналізуючи частотні характеристики нашої системи та використовуючи задані показники струмів гармонік, визначимо коефіцієнти  $n$ -ї гармонічної складової напруги, а також коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги для різних варіантів схем ФКП.

На рис. 3.1 зображені частотні характеристики досліджуваної системи електропостачання, які характеризують процес увімкнення компенсувальних пристроїв .

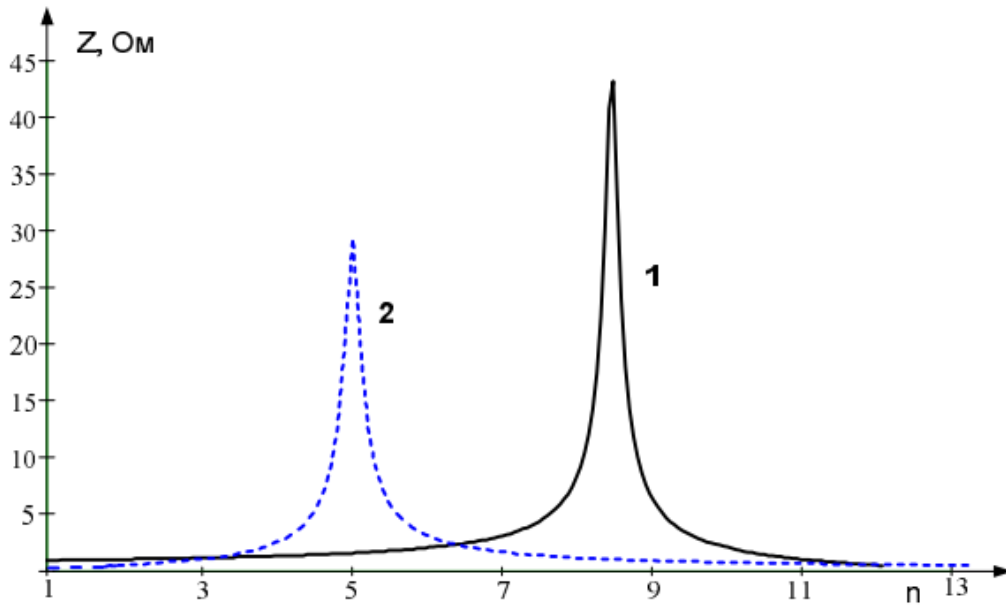


Рис. 3.1. Частотна характеристика системи електропостачання:  
1 – схема без увімкнення КП; 2–схема з увімкненим ком ФКП

Як слідує з рис. 3.1, у випадку увімкнення ФКП відбувається зміщення в зону 5-ї гармоніки піка частотної характеристики, у результаті відбувається зростання коефіцієнта 5-ї гармонічної складової напруги та коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги на шинах 6 кВ.

Як зазначалося вище, допустимі значення цих показників для напруги 6 кВ не повинні перевищувати 5,0 %, а граничнодопустимі значення - 8 %. Виходячи з цього, для цієї системи електропостачання з використанням компенсуючого пристрою необхідно вжити заходи для зниження рівнів гармонік з метою покращання показників ЯЕ, до нормативних значень. Тому розглянемо кілька варіантів використання фільтрокомпенсуючих пристроїв, враховуючи можливі відхилення параметрів фільтрів від номінальних.

Здійснимо моделювання фільтрокомпенсуючого перетворювача в програмному комплексі MATLAB (рис. 3.3) для трифазної системи, з підключеним трифазним ФКП паралельного типу (рис. 3.2).



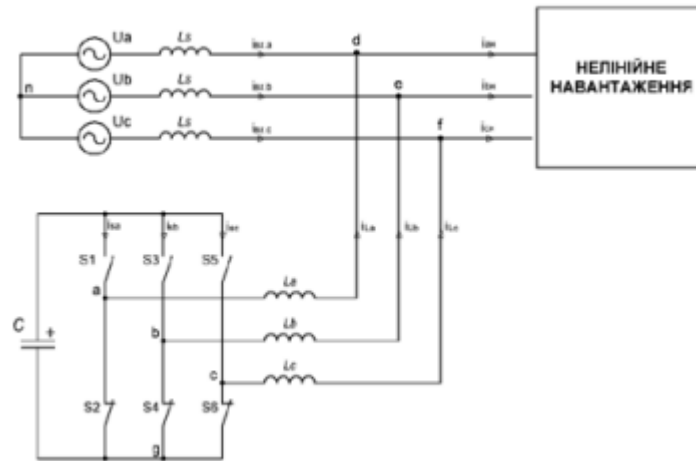


Рис. 3.2. Спрощена схема ФКП паралельного типу

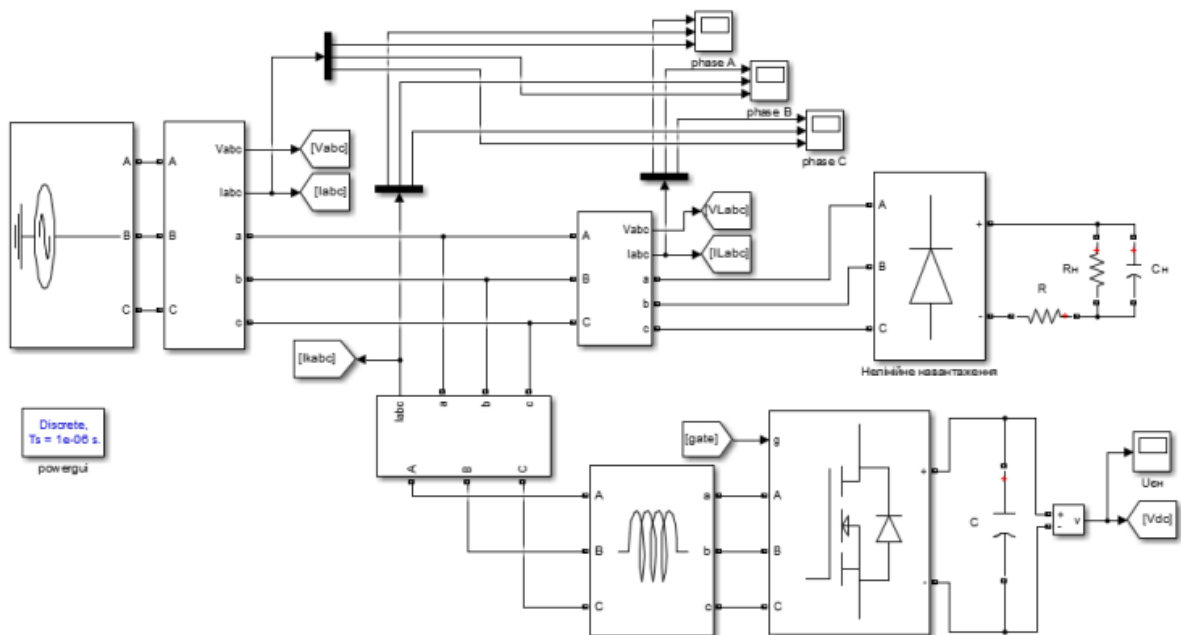


Рис. 3.3. Модель силової частини ФКП в програмному пакеті Simulink

За допомогою моделі було проведено оцінку якості фільтрації струму. Діаграми змін струму навантаження, обчисленого результуючого струму споживання та струму компенсатора для однієї з фаз наведено на рис. 3.4.

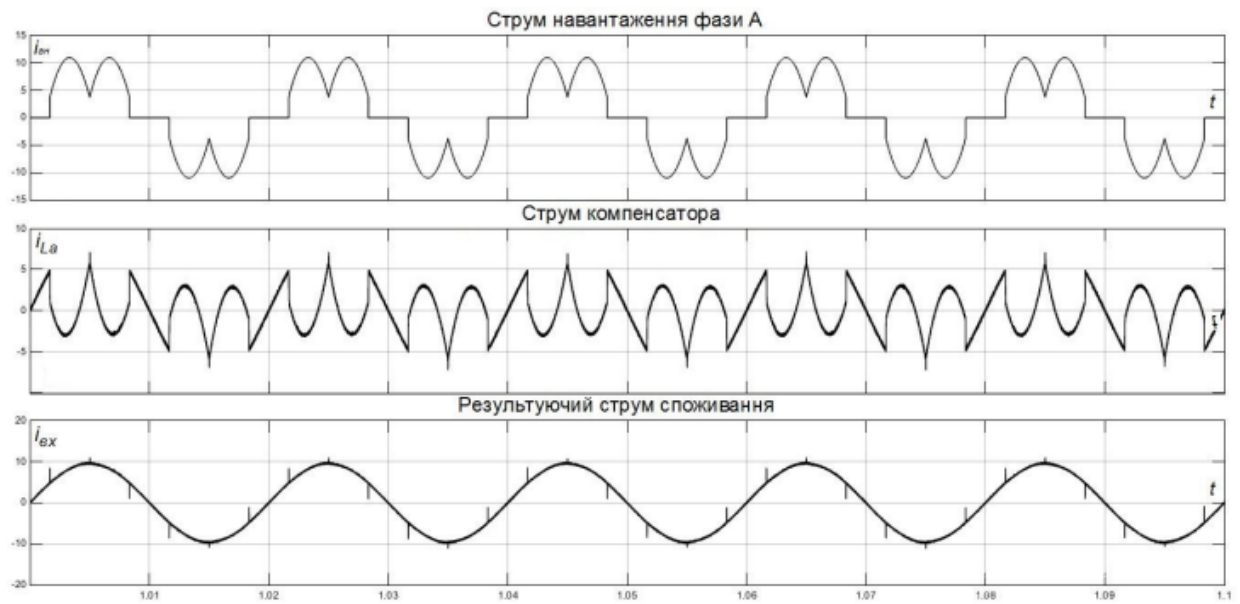


Рис. 3.4. Часові діаграми струмів системи

Спектрограми струму навантаження та вхідного струму представлені на рис. 3.5 представлені результати моделювання, згідно з якими застосування ФКП дозволяє знизити THD споживаного струму до рівня 2,52%, що цілком відповідає вимогам чинних стандартів.

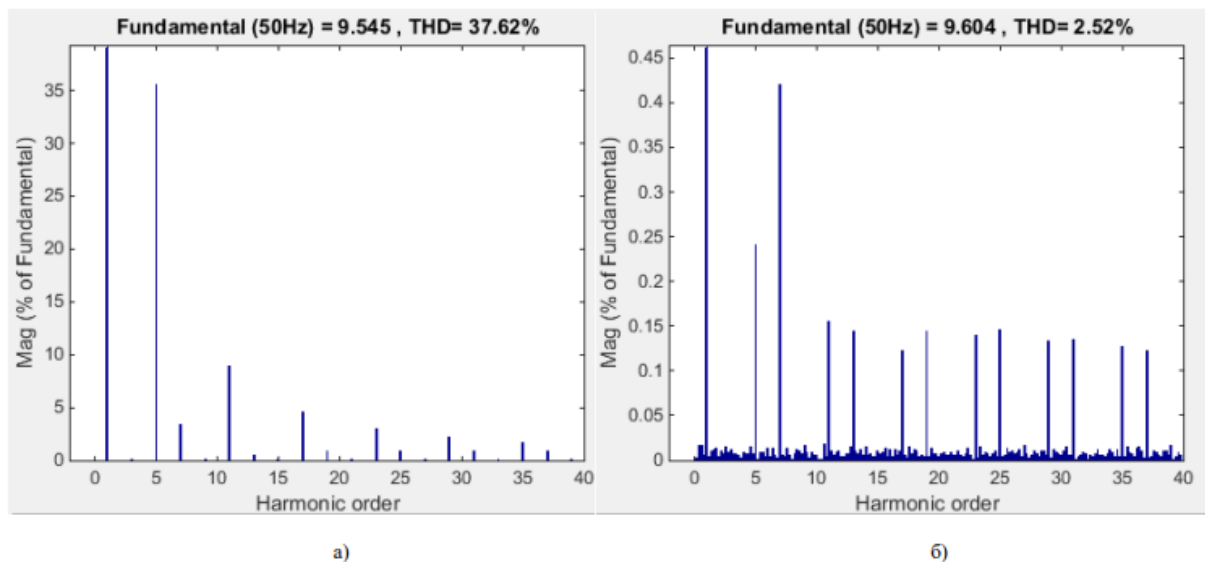


Рис. 3.5. Спектрограми струму навантаження та вхідного струму

### 3.2. Корекція фільтрації гармонік ФКП підстанції

Встановлені ФКП забезпечують компенсацію реактивної потужності, але повною мірою не справляються з корекцією гармонік.

За допомогою аналізатора якості електроенергії виявлено, що рівень гармонійних спотворень становить: 5-та гармоніка – 6% від основного сигналу; 7-ма гармоніка – 4%; 11-та гармоніка – 3% (рис. 3.6). Загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) – 8%, що перевищує допустимі норми.

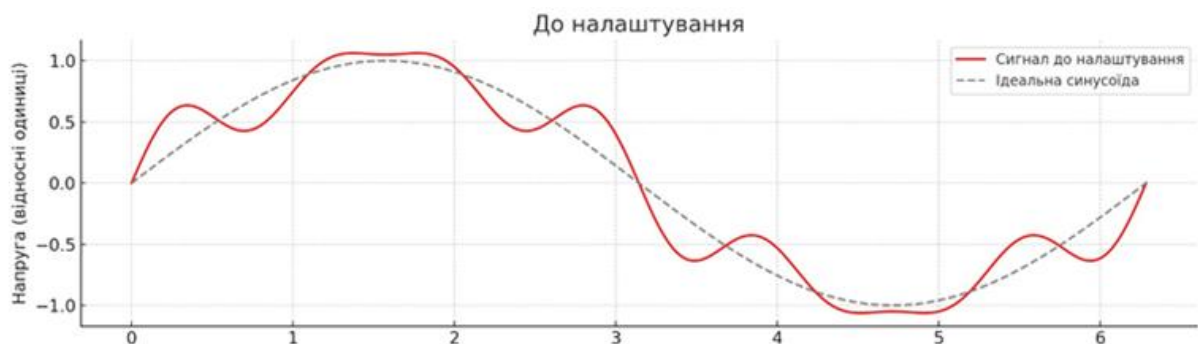


Рис. 3.6. Рівень гармонічних спотворень до налаштувань ФКП

Перевірено параметри наявних фільтрів, і виявлено, що встановлений пасивний фільтр неефективно справляється з 5-ю і 7-ю гармоніками, оскільки був розрахований на нижчий рівень спотворень.

Для корекції 5-ї та 7-ї гармонік ухвалено рішення додати додаткові пасивні фільтри: фільтр 5-ї гармоніки (5-ти кратна частота основного сигналу) з налаштуванням на 300 Гц; фільтр 7-ї гармоніки з налаштуванням на 420 Гц.

Встановлено резонансні фільтри, налаштовані на частоти 300 Гц і 420 Гц відповідно, що дозволяє ефективно гасити 5-ту і 7-му гармоніки.

Налаштовано параметри захисту для нових фільтрів для уникнення перегріву та перевантаження.

Після установки і налаштування фільтрів знову виконано аналіз якості електроенергії: рівень 5-ї гармоніки знизився до 2%; рівень 7-ї гармоніки – до

1.5%; THD зменшився до 4%, що відповідає допустимим нормам (рис. 3.7). Це демонструє ефективність додаткового налаштування для зменшення гармонійних спотворень.

Налаштовано автоматичний моніторинг рівня гармонік для регулярного відстеження спотворень у мережі. Заплановано щоквартальне технічне обслуговування та перевірку фільтрів для забезпечення стабільної роботи ФКП.

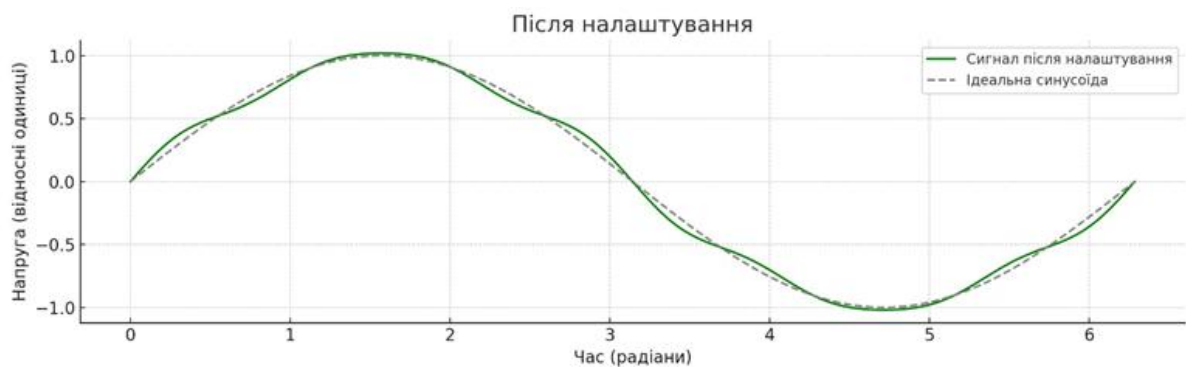


Рис. 3.7. Рівень гармонічних спотворень після налаштувань ФКП

Отже, завдяки встановленню додаткових пасивних фільтрів та налаштуванню їх на конкретні гармоніки було досягнуто суттєвого зниження рівня гармонійних спотворень. Це дозволило не лише покращити якість електроенергії, а й підвищити надійність роботи обладнання, підключеного до мережі.

### 3.3. Модель активного фільтра для корекції гармонік

Основним завданням для поліпшення ефективності роботи активного фільтра є забезпечення якісного управління його напівпровідниковими елементами.

Модель активного фільтра для корекції гармонік можна уявити як динамічний пристрій, який в реальному часі аналізує гармонійні складові сигналу та генерує компенсуючий сигнал для їх нейтралізації.

Розглянемо спочатку використання активного фільтру для поліпшення електромагнітної сумісності. Модель системи з активним фільтром та нелінійним навантаженням представлена на рис. 3.8.

Датчики струму та напруги вимірюють параметри мережі, і в режимі реального часу визначають рівень гармонік. Контролер (регулятор) аналізує сигнал та виділяє гармонійні компоненти, котрі потрібно компенсувати. Інвертор (перетворювач) створює протилежний за фазою компенсуючий сигнал на частотах виявлених гармонік. Фільтр на виході забезпечує чистий компенсуючий сигнал, який призначений для усунення високочастотних впливів елементів інвертора.

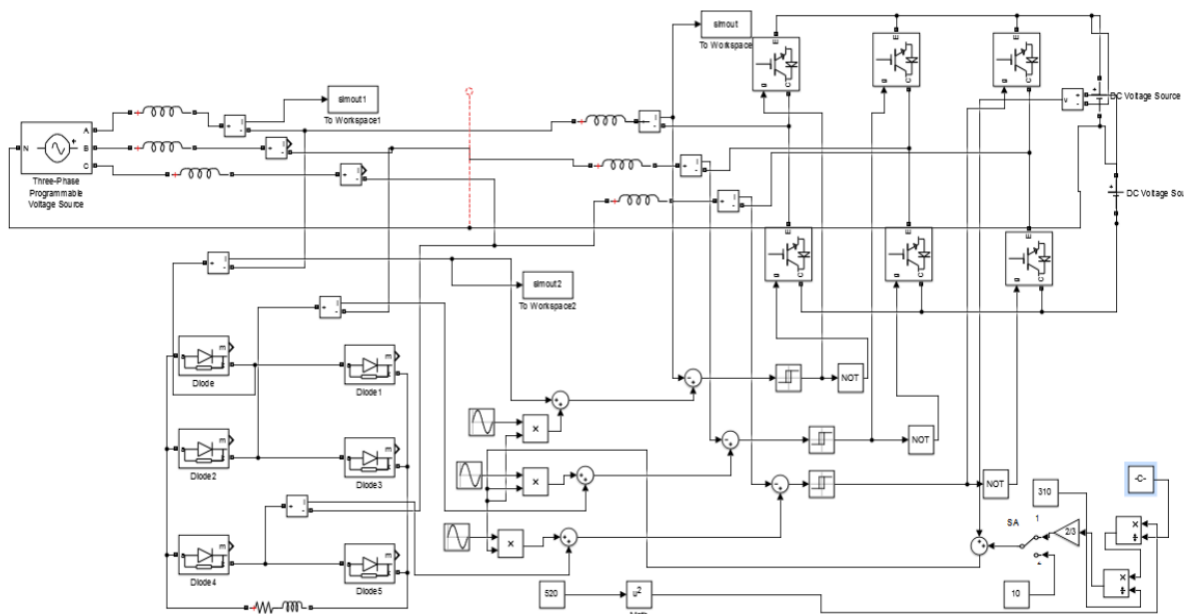


Рис. 3.8. Модель системи з активним фільтром та нелінійним навантаженням

Для елементів даної моделі застосуємо такі налаштування: номінальна напруга – 6 кВ; частотний діапазон - 250–500 Гц, налаштований для роботи з 5, 7, і вищі; час відгуку є дуже важливим параметром, оскільки фільтр повинен швидко реагувати на зміну гармонічного складу, встановимо його на рівні 1 мс; максимальна потужність компенсації, яку фільтр здатен компенсувати – для лінії збірних шин підстанції цей показник на рівні 4 МВАр, його і застосуємо.

Алгоритм контролера реалізує пропорційно-інтегрально-диференційний (PID) закон регулювання. Спочатку здійснюється аналіз гармонік: фільтр зчитує сигнали  $i$ , за допомогою перетворення Фур'є, виділяє окремі гармоніки. Далі контролер придушує гармоніки, формуючи протилежний за фазою сигнал на частоті кожної виявленої гармоніки. Після цього інвертор створює цей сигнал та вносить його в мережу.

Дана модель дозволяє ефективно прибирати гармонічні спотворення, покращуючи якості електроенергії, стабілізувати напругу та знизити втрати.

Трифазний активний фільтр (рис.3.9), реалізований на основі автономного інвертора напруги, включає в себе три напівмостові схеми (VT1–VT6), конденсаторний накопичувач (C), реакторну групу (L1–L3).

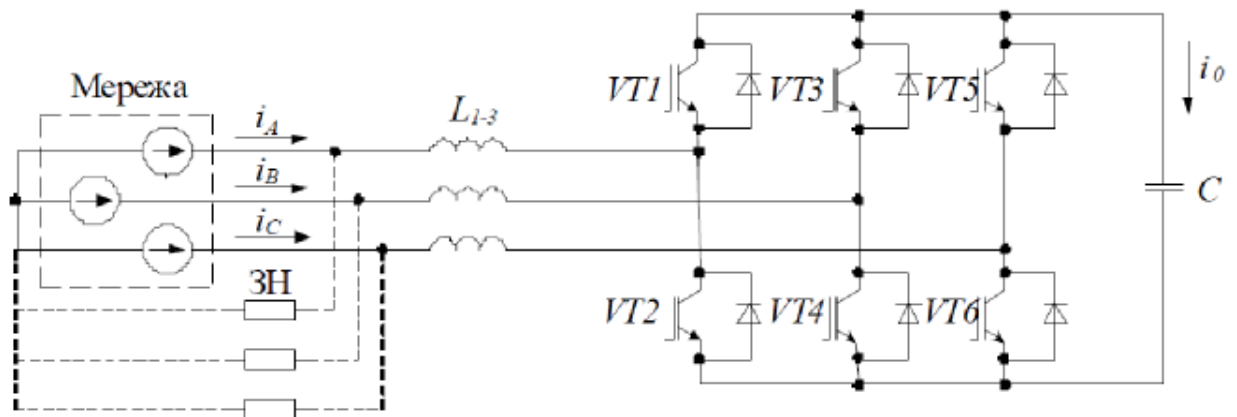


Рис. 3.9. Схема трифазного перетворювача

Використання АФ на основі автономного інвертора напруги забезпечує ефективне вирішення проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) у перетворювальних системах із керованими випрямлячами (КВ). Однак цей підхід має свої недоліки. Одним із них є необхідність компенсації реактивної потужності засобами АФ на стороні мережі живлення. У певних режимах роботи силової схеми ця потужність може бути співставною з номінальною потужністю навантаження.

Такі обмеження викликають збільшення втрат у керованих ключах фільтра; необхідність проектування силового активного фільтра (САФ) із

потужністю, еквівалентною потужності КВ, що впливає на загальну ефективність. У результаті зазначені фактори призводять до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) перетворювальної системи.

Для забезпечення високої якості електроенергії на вході або виході напівпровідникових перетворювачів широко застосовуються різні методи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Проте моделювання таких систем ускладнюється через велику кількість міжкомутаційних інтервалів (до кількох сотень) на період повторення.

На графіку (рис. 3.10) відображено динаміку змін форми сигналу до та після застосування активного фільтра.

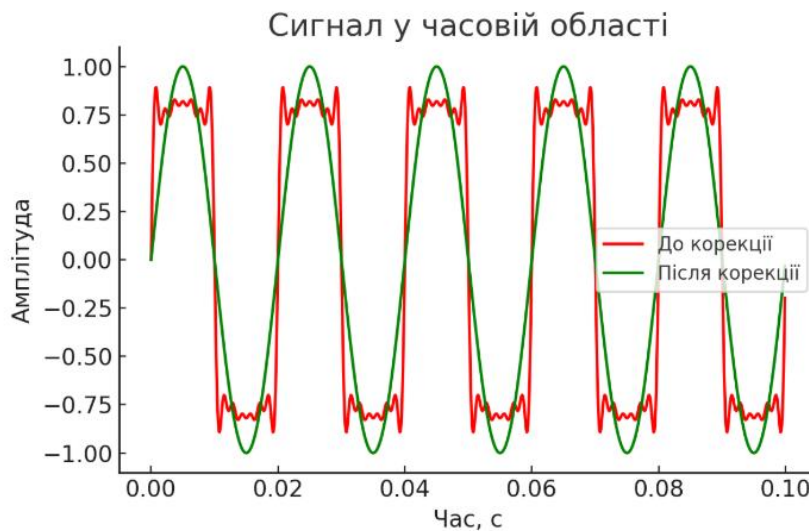


Рис. 3.10. Форми сигналу до та після корекції активним фільтром

До корекції синусоїдальний сигнал зазнає суттєвих спотворень через наявність гармонік 3, 5, 7, 9, 11 і 13 порядку, що значно викривляють його форму. Після налаштування та активації фільтра гармонійні спотворення значно знижуються. Сигнал набуває форми, що наближена до ідеальної синусоїди. Результати підтверджують ефективність роботи активного фільтра, який забезпечує зменшення впливу гармонік та покращення якості напруги в мережі.

### **3.4. Розробка імітаційної моделі гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв на основі паралельного та послідовного активних фільтрів**

Гібридні фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) актуальні для підвищення якості електроенергії в системах електропостачання підприємств. Вони поєднують активні та пасивні фільтри, що дозволяє ефективно компенсувати гармонічні спотворення, провали та відхилення напруги. Спільне застосування пасивних і активних компонентів зменшує номінальні параметри активних фільтрів, знижує масо-габаритні показники та вартість силових елементів, а також забезпечує багатофункціональність таких систем.

Основними топологіями гібридних ФКП є паралельні та послідовні системи. У першому випадку гібридна ФКУ спрямована на компенсацію вищих гармонічних складових струму і відхилень напруги. У другому випадку пристрій забезпечує компенсацію гармонік струму, провалів та спотворень напруги. Такі системи дозволяють одночасно усувати кілька видів спотворень, забезпечуючи стабільну роботу електропостачання.

При математичному моделюванні приймаються такі спрощення: силові елементи активних фільтрів вважаються ідеальними ключами, а нелінійні залежності в процесі розрахунків апроксимуються як лінійні. Це дозволяє оцінити ефективність гібридних систем у компенсації спотворень, мінімізувати вплив гармонік та стабілізувати напругу в мережі, що значно покращує якість електроенергії.

Структури гібридних ФКУ зображені на рис. 3.11 (а, б).



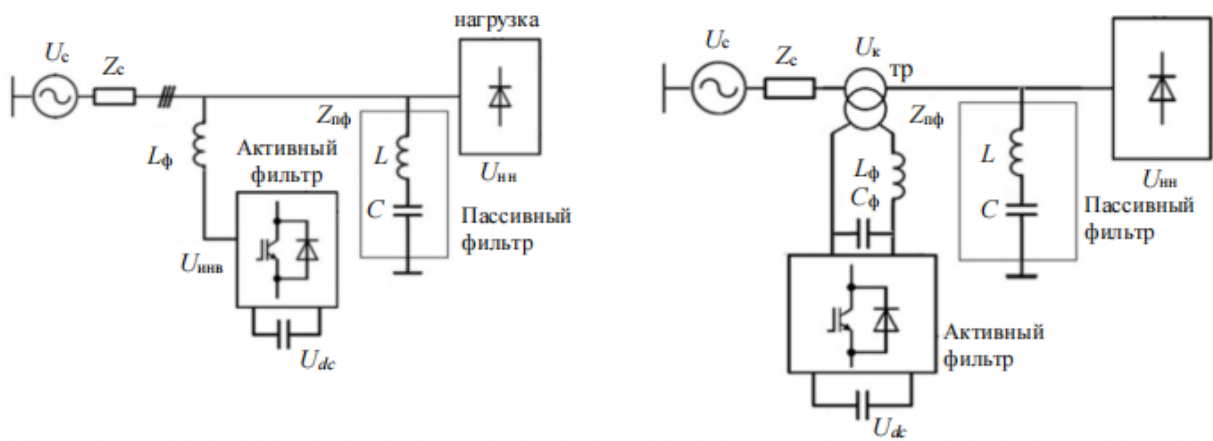


Рис. 3.11. Структури гібридних ФКУ № 1 (а) та № 2 (б)

Система управління активною частиною (паралельний активний фільтр) гібридної ФКУ № 1 реалізується на основі фазових перетворень та фазової синхронізації опорних величин. Система управління вимірює фазні напруги мережі ( $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ ) і перетворює їх на двофазну систему  $\alpha\beta$  наступним чином:

$$U_\alpha = U_a - \frac{U_b - U_c}{2} \quad (3.1)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} (U_b - U_c) \quad (3.2)$$

Фазові перетворення дозволяють визначити кут  $\varphi$  між вектором напруги мережі та його проекцією на вісь  $\alpha$ , що дає інформацію про рівень спотворень, присутність вищих гармонік, а також фазове зрушення між напругою та струмом у мережі. Отримані струми ( $i_{oa}$ ,  $i_{ob}$ ,  $i_{oc}$ ) використовуються для формування імпульсів керування силовими ключами інвертора активного фільтра, які, у свою чергу, надають дані про вищі гармоніки, що потребують компенсації за допомогою паралельного активного фільтра в складі гібридного ФКУ №1.

На основі зазначених структур були розроблені комп'ютерні імітаційні моделі гібридних ФКУ №1 та №2 у середовищі Simulink MATLAB. Віртуальні моделі враховують параметри існуючих систем електропостачання та включають системи управління активними частинами обох пристроїв. Як приклад, імітаційна модель ФКУ №1 представлена на рис.

3.12. У моделюванні використовувалися дані промислової розподільчої мережі, яка включала джерело живлення з лінією 6 кВ потужністю трифазного короткого замикання 250 МВА, трансформатор 6/0,4 кВ потужністю 100 кВА та нелінійне навантаження, представлене трифазним мостовим некерованим випрямлячем із активно-індуктивним навантаженням потужністю 80 кВА.

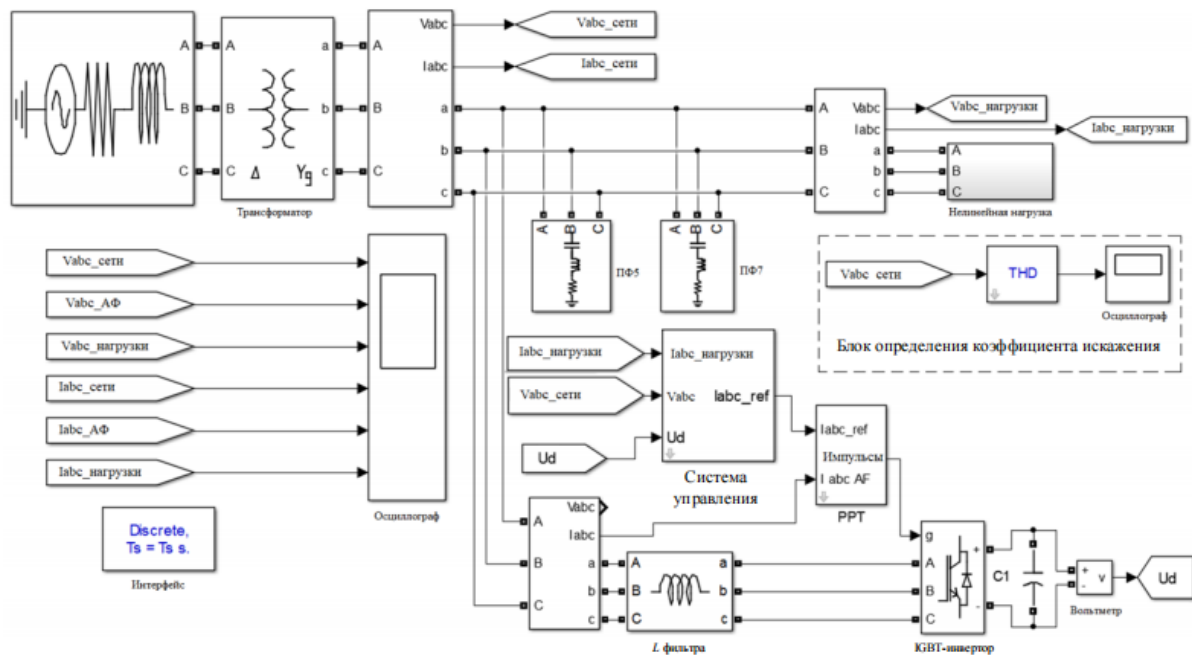


Рис.3.12. Імітаційна модель ФКУ № 1

При моделюванні активний фільтр налаштовувався на придушення гармонік струму в діапазоні від 2 до 40 порядку. Зазвичай серійні активні фільтри налаштовуються на фіксований діапазон гармонік, а більш дорогі модифікації з удосконаленими алгоритмами роботи дозволяють придушувати окремі гармоніки залежно від вимог до якості електроенергії.

При створенні імітаційної моделі параметри мережі живлення та підключеного навантаження задавалися у відносних одиницях, де базисними величинами виступали усереднені значення потужностей і опорів елементів у години максимального навантаження. Для моделювання були взяті приклади з реальних технологічних установок підприємств, де потужності електроустановок перевищують кілька сотень кВт. Рівень спотворення

струму навантаження варіювався в межах від 9 до 30%, а напруги мережі — від 2 до 15%. Ці дані відповідали результатам експериментальних досліджень у промислових електромережах.

Результати моделювання показали, що використання гібридного фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКУ) значно зменшує гармонійні спотворення. Наприклад, сумарний коефіцієнт гармонійних складових за струмом (THDI) зменшився на 91%, а за напругою (THDU) — на 72%. Коефіцієнти окремих гармонік також демонструють значні поліпшення: 5-та гармоніка за струмом зменшилася на 96%, за напругою — на 75%, 7-ма гармоніка за струмом — на 97%, а за напругою — на 68%.

Застосування гібридного ФКУ №1, активна частина якого виконана за паралельною схемою, дозволило не лише компенсувати вищі гармоніки струму в мережі, але й компенсувати реактивну потужність, забезпечуючи коефіцієнт потужності, близький до одиниці. Порівняння енергетичних показників системи до і після застосування ФКУ №1 підтвердило ефективність цього рішення. Активна потужність залишилася практично незмінною (0,292 без ФКУ проти 0,293 з ФКУ), однак реактивна потужність суттєво знизилася (з 0,067 до 0,001 відносних одиниць), а коефіцієнт потужності підвищився з 0,974 до 0,999. Це свідчить про суттєве поліпшення характеристик якості електроенергії та ефективності системи в цілому.

Система управління послідовного активного фільтра в складі гібридного ФКУ №2 реалізована з використанням перетворень трифазної системи напруги мережі на компоненти прямої, зворотної та нульової послідовності, що відповідає перетворенням Фортеск'ю. Виділені складові прямої послідовності використовуються як опорні величини для компенсації провалів, відхилень і спотворень напруги за допомогою послідовного активного фільтра (рис. 3.13).

Моделювання продемонструвало здатність гібридного ФКУ №1, заснованого на паралельному активному фільтрі, здійснювати одночасну компенсацію вищих гармонік струму і напруги та корекцію коефіцієнта

потужності. На рис. 3.14 зображені осцилограми форми напруги в мережі до і після підключення ФКУ різних типів.

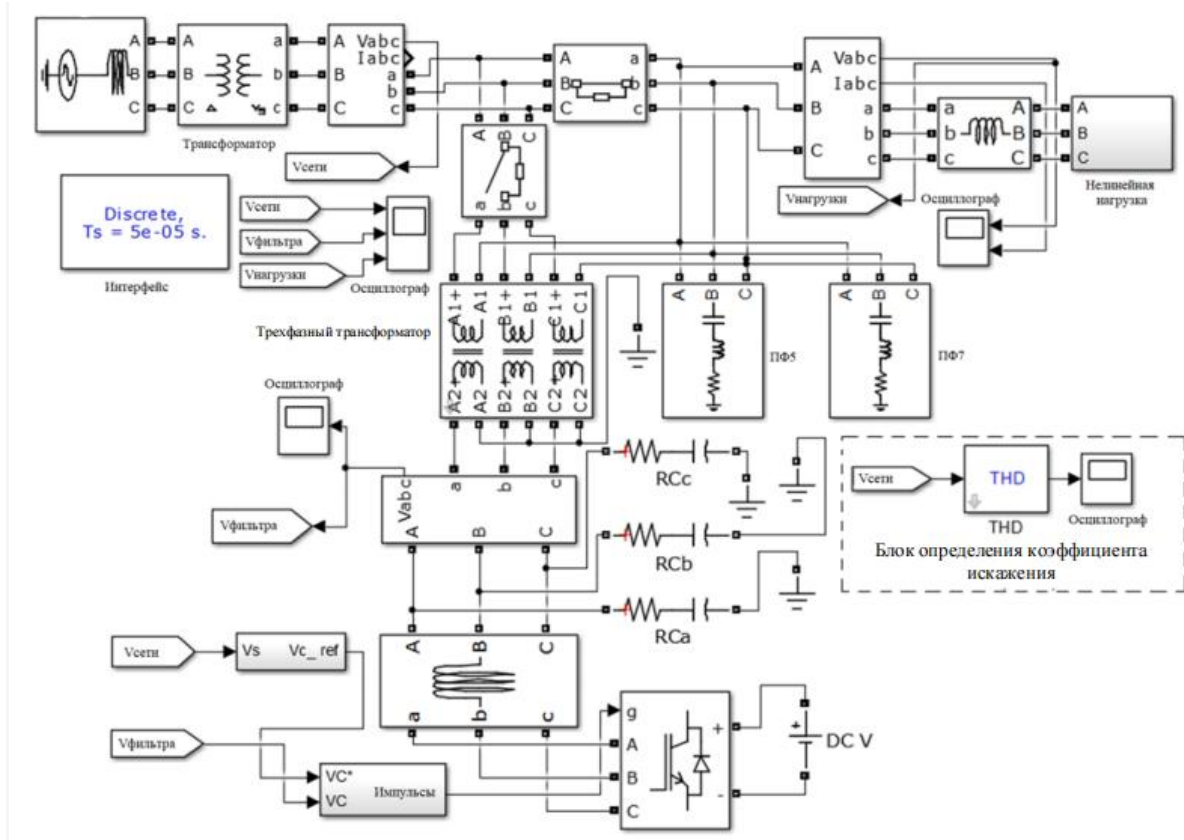


Рис. 3.13. Імітаційна модель ФКУ №2

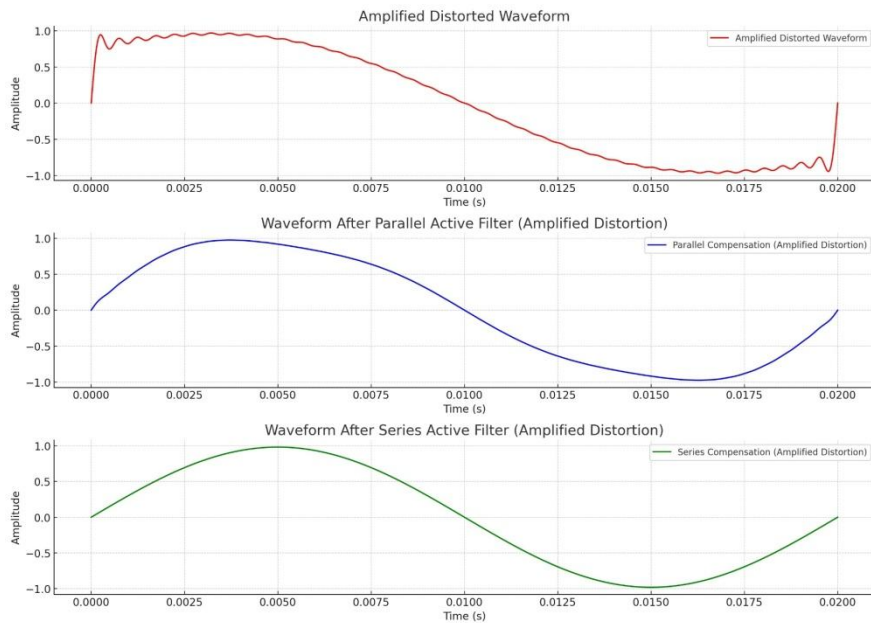


Рис. 3.14. Форми напруги в мережі до та після підключення ФКУ №1 та ФКУ №2

Спотворення напруги після паралельного фільтру значно менші, але їх вплив залишився через неповне усунення низькочастотних гармонік.

Послідовний фільтр забезпечує практично повну компенсацію, роблячи його кращим вибором для систем із високими гармонійними спотвореннями.

Зокрема, сумарний коефіцієнт гармонійних складових струму знизився на 93,16%, а напруги — на 72,14%. Коефіцієнт потужності мережі зріс на 12,35%, що підтверджує багатофункціональність ФКУ №1 та його здатність працювати в більш складних електротехнічних системах для автоматизованого підвищення якості електроенергії. Незначне підвищення активної потужності на 0,4% пов'язане з активними втратами в силових ключах активної частини ФКУ при компенсації гармонік.

Гібридне ФКУ №2 із послідовною активною частиною забезпечує додавання напруги для нормалізації її рівня, одночасно компенсуючи провали та придушуючи вищі гармоніки напруги, знижуючи їх рівень на 85%. Використання активної частини у вигляді послідовного або паралельного активного фільтра значно підвищує ефективність компенсації гармонік. Для ФКУ №1 із паралельним активним фільтром рівень спотворень струму (THDI) знижується з 29,09% до 2%, а для ФКУ №2 із послідовним активним фільтром рівень спотворень напруги (THDU) зменшується з 14,38% до 2,14%.

### **Висновки до 3 розділу**

У 3 розділі були проаналізовані можливі відхилення параметрів фільтрів із-за технології виробництва і впливу навколишніх факторів. Досліджено, що ця величина досягає 12 %. Зміна частоти мережі на 8 % погіршує якість налаштувань фільтра. На основі вимірювань було проведено корекцію цих налаштувань. Також була побудована модель керування ФКП КРЗ-8, проведена оцінка якості фільтрації струму. Розглянута модель АФ, її структура, параметри, алгоритм роботи, проведено її моделювання у мережі з

нелінійним навантаженням. Дана модель показала свою ефективність у боротьбі з гармонічними спотвореннями. На основі структур паралельної та послідовної САФ побудовані імітаційні моделі гібридних ФКП. ГФ на основі паралельного АФ показало більшу ефективність з компенсації реактивної потужності. Результати моделювання підтвердили ефективність поєднання систем активної та пасивної фільтрації, які у 2 рази знижують рівень гармонік.

## ВИСНОВКИ

У дипломному проекті було досліджено роботу фільтрокомпенсуючого пристрою лінії збірних шин №3 підстанції КРЗ-8, детально проаналізовані рішення щодо покращення якості електроенергії даної системи, обрано найбільш оптимальний метод фільтрації гармонічних спотворень.

Магістерська робота у своєму складі має три розділи, у ході їх виконання було виконано наступні етапи:

1. Проведений аналіз спотворень якості електроенергії, які присутні у мережах під впливом споживачів з нелінійними характеристиками струму, досліджений їхній вплив на роботу електрообладнання, розглянуті основні способи зменшення цього впливу. Особливу увагу надано огляду показників, що застосовуються для аналізу гармонічних спотворень. Загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) серед них є основним. Для напруги він не повинен перевищувати 5%, для струму – 8%.
2. Аналіз ФКП підстанції підстанції КРЗ-8 виявив обмеженість системи у гнучкості, швидкості реакції та точності, що спонукало до пошуку більш оптимального рішення. Розглянуті сучасні засоби фільтрації гармонік. Здійснено загальне порівняння активних, пасивних та гібридних фільтрів, відзначені їхні переваги та недоліки, розглянута можливість їхнього застосування в мережі підстанції.
3. Проаналізовані можливі відхилення параметрів встановленої на підстанції системи фільтрації, здійснені вимірювання показників якості, проведено корекцію її налаштувань. Зокрема, після встановлення резонансних фільтрів, налаштованих на частоти 300 Гц і 420 Гц рівень 5-ї гармоніки знизився до 2%, 7-ї гармоніки – до 1.5% відповідно, THD зменшився до 4%. Моделювання існуючої системи показало ефективність її застосування, THD споживаного струму вона знижує до рівня 2,52%, що цілком відповідає вимогам чинних стандартів.

4. Силові активні фільтри є найбільш ефективними у боротьбі з гармонічними спотвореннями. Результати моделювання підтверджують це. Однак, необхідність компенсації реактивної потужності засобами САФ суттєво знижують їх ККД.

5. ФКП, побудовані на базі паралельних і послідовних активних фільтрів, є ефективними засобами для покращення якості електроенергії в системах електропостачання підприємств. ГФ на основі паралельного активного фільтра здатне компенсувати реактивну потужність, наближаючи коефіцієнт потужності до одиниці, знижувати спотворення струму в десять разів, а напруги — у чотири рази. Послідовний активний фільтр у складі ГФ знижує відхилення напруги на 15% і ступінь її спотворення в сім разів. Спільне використання активних і пасивних фільтрів підвищує ефективність компенсації гармонік струму та напруги більше ніж удвічі. Результати моделювання підтвердили багатофункціональність і перспективність гібридних ФКП.

6. Отже, оцінюючи переваги та недоліки, та опираючись на результати досліджень, робимо висновок, що найбільш оптимальним рішенням для роботи в мережі 6 кВ підстанції КРЗ-8 є ГФ. Дані системи хоч і поступаються АФ у якості фільтрації гармонічних спотворень, проте більш ефективні при наявності кількох типів спотворень та у мережах із різкими змінами навантаження або при нестабільності параметрів. Також це є більш економічне рішення у порівнянні з повністю активними фільтрами.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Системи фільтрації вищих гармонік. URL: <https://activ-energy.com.ua/elektroaudyt/filtratsiia-vyshchychkh-harmonik.html>. (дата звернення: 05.09.2024).
2. Войцицький А.П., Колос Ю.А. Аналіз причин погіршення якості показників електроенергії, які характеризують форму напруги. Науковий вісник, 2016. Том 19 (1). С. 264-269.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [чинний від 2014-10-01 ]. Видання офіційне. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.
4. Шкрябець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010. С. 238.
5. Заболотний І.П. Конспект лекцій з курсу «Електричні системи і мережі» для студентів денної та заочної форм навчання напрямку електротехніка. Донецьк: ДонНТУ, 2002. С. 14.
6. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. Electrical Power Systems Quality, Third Edition. US: McGraw-Hill Professional, 2012. 528 p.
7. Карюк А. О., Ієрусалімова Т. С., Сєдова О. О. Вищі гармоніки в промислових та побутових системах електропостачання. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 2017. Вип. 186. С. 59-61.
8. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
9. Галаган І.В. Підвищення ефективності функціонування системи електрична мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження: маг. дис. студента : 09.11.22. Київ. 2022. 91с.
10. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник. Дніпро: НГУ, 2016. 599 с.

11. Власенко Р.В., Бялобржеський О.В. Застосування силового активного фільтру при компенсації струму несиметричного нелінійного навантаження. Вісник Приазовського державного технічного університету, 2015. Вип. 31. С. 156 – 164.
12. Миколаєць Д. А., Мацюк М. О. Застосування р-q теорії для керування трифазним фільтрокомпенсуючим перетворювачем. Електронна та Акустична Інженерія, 2018. Том 1(1), С. 6–12.
13. Sychev Y.A., Zimin R.Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. Journal of Mining Institute, 2021. Vol. 247. P. 132 – 140.
14. Варецький Ю. О., Гайдзіца М., Коваль О.О. Проблема перенапруг на силових фільтрах у промислових електричних мережах. Електроенергетичні системи, 2023. № 1 (6), С. 20 – 28.
15. Варецький Ю.О., Наконечний Т.І. Особливості вибору силових фільтрів для систем електропостачання змінних нелінійних навантажень. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2008. № 615. С. 17-23.