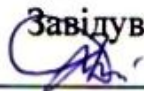


Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

 /Дмитро БОСИЙ/

« 20 » 12 20 21 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

Тема Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці

Theme Parameters optimization of filter-compensating devices on Bucha-Teteriv section of the South-Western Railway

Керівник дипломної роботи

доцент  Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер

доцент  Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2026

 Дмитро ЛЕВЧЕНКО

Student

Levchenko Dmytro

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри



Дмитро Босий

(підпис)

« 25 » січня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи **ЕС2026** **Левченка Дмитра Сергійовича**

- 1 Тема дипломної роботи: **«Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці»**
затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 31ст
- 2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.
- 3 Вихідні дані до дипломної роботи: параметри електрифікованої ділянки, дані спожитої електроенергії на розрахунковій ділянці.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): проблеми несинувідальних режимів в системі електропостачання; аналіз застосування сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв; оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів.
- 5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	10.12	5
2.	ПРОБЛЕМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
3.	АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	11.11	40
4.	ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ДІЛЯНЦІ БУЧА-ТЕТЕРІВ	01.12	20
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи



Дмитро Босий

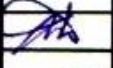
Завдання прийняв до виконання



Дмитро Левченко

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ПРОБЛЕМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	9
1.1 Нормування показників несинусоїдальних режимів електропостачання.....	9
1.2 Основні джерела вищих гармонік у системах електропостачання	12
1.3 Вплив вищих гармонік на елементи системи електропостачання.....	16
1.3.1 Втрати від найвищих гармонік в електричних машинах.....	17
1.3.2 Втрати потужності у трансформаторах.....	17
1.3.3 Вплив найвищих гармонік на ізоляцію.....	18
1.3.4 Вплив найвищих гармонік на облік електроенергії.....	19
1.4 Вплив вищих гармонік на ділянці електрифікованої залізниці.....	20
2 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ.....	22
2.1 Особливості системи тягового електропостачання змінного струму.....	22
2.2 Активні та пасивні фільтри	23
2.3 Схемотехнічний склад нового ФКП.....	28
2.4 Аналіз показників несинусоїдності напруги в тягових мережах при застосуванні ФКП різних конфігурацій.....	31
3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ДІЛЯНЦІ БУЧА-ТЕТЕРІВ.....	38
3.1 Аналіз існуючої фільтрокомпенсуючої установки на ділянці Буча-Тетерів.....	38
3.2 Розрахунок нової фільтрокомпенсуючої установки	40
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник		Д. Левченко		20.12			5	49
Керівник		Д. Босий		20.12		УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2026		
Н. контр.		В. Перцевий		20.12				

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ /Дмитро БОСИЙ/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці**

Theme **Parameters optimization of filter-compensating devices on Bucha-Teteriv section of the South-Western Railway**

Керівник дипломної роботи доцент _____ Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2026 _____ Дмитро ЛЕВЧЕНКО

Student Levchenko Dmytro

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро Босий

{підпис}

« 25 » січня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2026 Левченка Дмитра Сергійовича

- 1 Тема дипломної роботи: **«Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці»**
затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 31ст
- 2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.
- 3 Вихідні дані до дипломної роботи: параметри електрифікованої ділянки, дані спожитої електроенергії на розрахунковій ділянці.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): проблеми несинувідальних режимів в системі електропостачання; аналіз застосування сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв; оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів.
- 5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	10.12	5
2.	ПРОБЛЕМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
3.	АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	11.11	40
4.	ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ДІЛЯНЦІ БУЧА-ТЕТЕРІВ	01.12	20
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи

Дмитро Босий

Завдання прийняв до виконання

Дмитро Левченко

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 49 сторінок, складається із 3 розділів та містить 18 ілюстрації, 5 таблиць, 20 використаних джерел.

Мета роботи – оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці.

У поданій роботі розглянуто сучасні проблеми несинусоїдальних режимів в системі електропостачання змінного струму. Визначено основні джерела вищих гармонік, та проаналізовано вплив вищих гармонік на елементи системи електропостачання.

Проаналізовано застосування сучасних фільтрокомпенсуючих установок та визначено вплив різних конфігурацій даних пристроїв на показники несинусоїдності напруги в тягових мережах. Проведено аналіз та зроблені висновки щодо забезпечення виконання нормативних вимог по дотриманню сумарного коефіцієнта гармонійних складових при використанні різних варіантів сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Проаналізовано існуючу фільтрокомпенсуючу установку на ділянці Буча-Тетерів та запропоновано удосконалення фільтрокомпенсуючого пристрою з покращеними техніко-економічними характеристиками.

Ключові слова: СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, НЕСИМЕТРІЯ, НЕСИНУСОЇДАЛЬНА НАПРУГА, ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧІ УСТАНОВКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ПРОБЛЕМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	9
1.1 Нормування показників несинусоїдальних режимів електропостачання.....	9
1.2 Основні джерела вищих гармонік у системах електропостачання	12
1.3 Вплив вищих гармонік на елементи системи електропостачання.....	16
1.3.1 Втрати від найвищих гармонік в електричних машинах.....	17
1.3.2 Втрати потужності у трансформаторах.....	17
1.3.3 Вплив найвищих гармонік на ізоляцію.....	18
1.3.4 Вплив найвищих гармонік на облік електроенергії.....	19
1.4 Вплив вищих гармонік на ділянці електрифікованої залізниці.....	20
2 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ.....	22
2.1 Особливості системи тягового електропостачання змінного струму.....	22
2.2 Активні та пасивні фільтри	23
2.3 Схемотехнічний склад нового ФКП.....	28
2.4 Аналіз показників несинусоїдності напруги в тягових мережах при застосуванні ФКП різних конфігурацій.....	31
3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ДІЛЯНЦІ БУЧА-ТЕТЕРІВ.....	38
3.1 Аналіз існуючої фільтрокомпенсуючої установки на ділянці Буча-Тетерів.....	38
3.2 Розрахунок нової фільтрокомпенсуючої установки	40
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробник		Д. Левченко			Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці	Літ.	Арк.	Аркушів
							5	49
Керівник		Д. Босий				УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2026		
Н. контр.		В. Перцевий						

ВСТУП

Актуальність роботи. На електрифікованих залізницях України використовують системи тягового електропостачання (СТЕ) однофазного змінного струму напругою 25 кВ. В даній системі в якості силових установок на електрорухомому складі використовують випрямно-інверторні перетворювачі. Особливість таких перетворювачів – низький коефіцієнт потужності, а також значні спотворення форми струмів та напруг у контактній мережі. У спектрах струмів переважають 3-, 5- та 7-а гармонійні складові.

Спотворення струму викликають значні спотворення кривої напруги. По відношенню до гармонік високого порядку протяжна контактна мережа поводить себе як лінія з розподіленими параметрами. Хвильові процеси в тяговій мережі супроводжуються резонансними явищами, що ще більше збільшують спотворення напруги.

Проведений аналіз якості електроенергії в системах тягового електропостачання, показав, що основними факторами, що впливають на характеристики СТЕ, виступають знижена напруга в кінці протяжної ділянки, режимні перенапруги, спричинені резонансними явищами контактної мережі, і навіть зменшення середньої величини напруги.

Режими роботи мереж тягового електропостачання значно відрізняються від режимів промислових або муніципальних систем електропостачання, тому при розробці заходів щодо покращення якості електроенергії необхідно враховувати перелічені особливості СТЕ.

На сьогоднішній день одним із перспективних способів зниження несинусоїдності в електричних мережах є застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП). Для тягових мереж змінного струму потрібні багатофункціональні пристрої, що забезпечують компенсацію реактивної потужності, придушення потужних низькочастотних гармонік та корекцію частотних характеристик СТЕ. Встановлювані ФКП повинні забезпечувати електромагнітну сумісність тягової мережі з ланцюгами живлення пристроїв

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

автоматики та телемеханіки.

Тому для досягнення більш високих енергетичних показників системи тягового електропостачання змінного струму та підвищення енергоефективності використання ЕРС необхідно впроваджувати сучасні системи ФКП та шукати нові способи визначення ступеню їх впливу на енергетичні показники системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технологій.

Мета і завдання роботи. Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці.

Об'єкт дослідження – фільтрокомпенсуючі пристрої на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці.

Предмет дослідження – вплив параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на енергетичні характеристики ділянки тягової мережі.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалося з використанням теоретичних досліджень провідних фахівців у даній галузі, обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист:

Набуті результати у ході виконання роботи дозволяють розширити межі знань науковців та дізнатись більше про процеси у тяговій мережі із застосуванням фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Проведено оцінку області застосування схем ФКП для фільтрації гармонік та показано ефективність фільтрації гармонічних складових при застосуванні нових схем ФКП.

Отримані результати показників несинусоїдності напруги в тягових мережах при застосуванні ФКП різних конфігурацій можна використати при дослідженні реального устаткування та при його створенні.

Визначені оптимізовані схемні рішення фільтрокомпенсуючих пристроїв

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

можуть використовуватись на розрахунковій ділянці.

Практичне значення отриманих результатів:

запропоновані схемні рішення можуть бути використані для оптимізації фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на науково-практичній конференції:

Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту», 28 жовтня 2021 р., Дніпро.

Публікації.

Левченко Д. С., Оптимізація параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів Південно-Західної залізниці / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 42 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ПРОБЛЕМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електроенергія, як особливий вид продукції, повинна мати певні характеристики, які дозволяють судити про її придатність для різних виробничих процесів. Дана сукупності характеристик, об'єднані загальним поняттям якості електроенергії (ЯЕ). Якість електроенергії оцінюється за техніко-економічними показниками, які враховують технологічну складову (брак та погіршення якості продукції, зниження продуктивності праці та механізмів, розлад технологічного процесу), електромагнітну складову (збільшення втрат електроенергії, пошкодження електрообладнання, порушення роботи автоматики, телемеханіки, зв'язку) та економічний збиток заподіяний народному господарству.

Якість електроенергії, поряд з надійністю, безпекою та економічністю, є однією з обов'язкових вимог, що висуваються до систем електропостачання. Забезпечення необхідної якості електричної енергії це проблема, яка є на всіх етапах існування електричної енергії, включаючи генерацію, передачу, розподіл та споживання.

Тривалий час основними режимними параметрами, що визначають якість електричної енергії, вважалися значення рівнів напруги у вузлах мережі та частоти в електричній системі. Однак у міру впровадження в технологічні виробничі процеси електроспоживачів, що мають нелінійні вольтамперні характеристики, все частіше доводилося враховувати можливі порушення симетрії, синусоїдальності форми кривої напруги в електричних мережах [1].

1.1 Нормування показників несинусоїдальних режимів електропостачання

В результаті інтенсифікації виробничих процесів, удосконалення та впровадження нової технології на підприємствах все в більшій мірі застосовують вентильні перетворювачі, установки однофазного та трифазного електрозварювання, потужні електродугові печі, вольт-амперні характеристики

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

яких нелінійні. Такі ж характеристики мають і силові трансформатори, потужні магнітні підсилювачі, газорозрядні лампи. Характерною особливістю цього обладнання є споживання з мережі несинусоїдальних струмів при підведенні до їх затискачів синусоїдальної напруги [2].

Несинусоїдні криві струмів можна розглядати як складні гармонійні коливання, що складаються з сукупності простих гармонійних коливань різних частот. Струми вищих гармонік, проходячи по елементах мережі, викликають падіння напруги в опорі цих елементів, які, накладаючись на основну синусоїду напруги, призводять до спотворення форми кривої напруги, до порушення якості електроенергії в мережі живлення, тобто виникає проблема електромагнітної сумісності електроприймачів з живильною мережею [3].

Несинусоїдальність напруги характеризується такими показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_u ;
- коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги $K_{u(n)}$.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги визначається як відношення чинного значення гармонійного вмісту несинусоїдальної напруги до напруги основної частоти:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n U_n^2}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де U_n - дійсне значення напруги n -ї гармоніки;

$U_{ном}$ - номінальне значення напруги;

n – номер останньої з гармонік які враховуються.

При підрахунку K_u допускається не враховувати гармоніки, величина яких менше 0,1%.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги в мережах з різними напругами наведені у табл. 1.1 (у відсотках) [2].

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги $K_u, \%$

Нормально допустимі значення при $U_{ном}, \text{кВ}$				Гранично допустимі значення при $U_{ном}, \text{кВ}$			
0,38	6...20	35	110...330	0,38	6...20	35	110...330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Нормально допустимі значення коефіцієнта n -ої гармонійної складової напруги в точках загального приєднання до електричних мереж з різними номінальними напругами $U_{ном}$ наведені в табл. 1.2 (у відсотках).

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти n -ї гармонійної складової напруги $K_{u(n)}, \%$

Непарні гармоніки, не кратні 3 при $U_{ном}, \text{кВ}$					Непарні гармоніки, кратні 3 при $U_{ном}, \text{кВ}$					Парні гармоніки при $U_{ном}, \text{кВ}$				
n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5						10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4										
25	1,5	1,0	1,0	0,4										

Нормально допустимі значення, наведені для $n = 3$ та 9, відносяться до однофазних мереж. У трифазних мережах ці значення приймають удвічі меншими, ніж наведені в табл. 1.2.

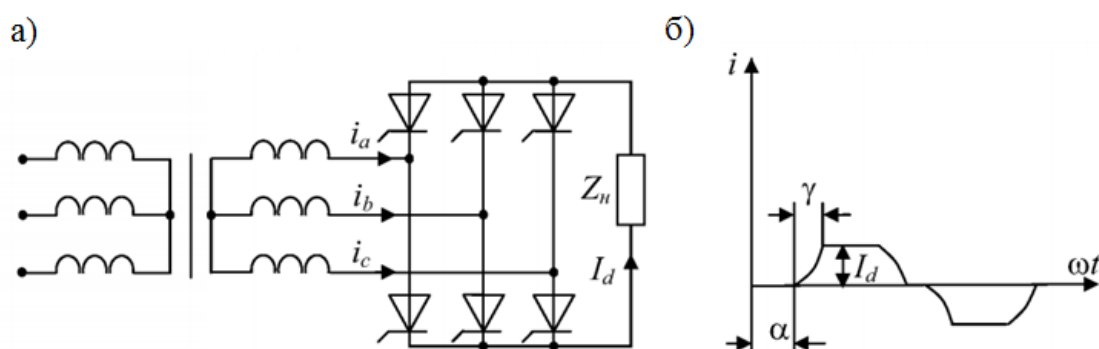
Гранично допустимі значення величини коефіцієнта n -ої гармонійної складової приймаються в 1,5 рази більшими, ніж наведені у табл. 1.2.

1.2 Основні джерела вищих гармонік у системах електропостачання

Прагнення підвищити продуктивність праці на сучасних підприємствах, а також ускладнення технологічних процесів зумовили широке застосування потужних регульованих вентильних приводів та перетворювальних установок, потужних дугових печей та зварювальних установок. Характерною рисою роботи таких споживачів є суттєвий вплив їх на якість електроенергії мереж живлення. У свою чергу нормальна робота електроустаткування залежить від якості електроенергії живильної системи.

Вентильні перетворювачі являються навантаженням з нелінійними характеристиками, та є джерелами вищих гармонік у системах електропостачання.

Найбільш поширені вентильні перетворювачі, представляються трифазною мостовою схемою (рис. 1.1). Мостові схеми широко застосовуються через їх гарні енергетичні характеристики, а також є основою для побудови більш складних багатомостових перетворювачів.



а - схема; б - діаграма струму фази

Рисунок 1.1 – Трифазна мостова схема

Ця схема випрямлення дозволяє здійснити так звану шестифазну або шестиімпульсну схему випрямлення. З'єднання послідовно або паралельно кількох випрямляючих мостів при живленні їх напругою, зміщеною на відповідний кут, дозволяє отримати 12, 18, 24, 48 ...-фазні схеми випрямлення (кратні шести). Зсув кута напруги здійснюється застосуванням відповідних схем з'єднання первинних чи вторинних обмоток трансформатору.

Крива фазного струму перетворювача, що працює на активноіндуктивне навантаження, є криволінійною трапецією. Форма кривої залежить від кутів комутації γ та управління α (рис. 1.1, б).

У кривій напруги в процесі комутації з'являються комутаційні спотворення, форма, величина та кількість яких залежить від схеми випрямлення, кількості фаз випрямлення, потужності перетворювачів, параметрів мережі живлення та кута управління перетворювачів [4].

Спотворені криві напруги і струму мережі живлення в процесі роботи перетворювача мають періодичний характер, що дозволяє виконувати їх гармонійний аналіз наявністю гармонік кратних основній частоті. Порядок вищих гармонік визначається виразом:

$$n = mk \pm 1,$$

де m - число фаз випрямлення;

$k = 1, 2, 3, \dots$ - послідовний ряд натуральних чисел.

Для мостового перетворювача при симетричному управлінні якого $m = 6$, в кривій напруги живлення є непарні гармоніки, які не кратні трьом: $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, \dots$; для 12- фазної схеми $n = 11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots$; для 24-фазної схеми $n = 23, 25, 47, 49, 71, 73$ і т. д [5].

Крім гармонійного спектру фазних струмів випрямляча, що визначається схемою випрямлення, існують так звані «анормальні» або неканонічні вищі гармоніки з порядками, що не відповідають числу пульсації випрямлення.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Причинами виникнення неканонічних гармонік є:

- відхилення кутів керування вентилями від номінального значення;
- живлення вентиляного перетворювача від мережі з спотвореною формою кривої напруги;
- живлення вентиляного перетворювача від мережі з несиметрією напруги.

Зазвичай неканонічні гармоніки пояснюються випадковими явищами і визначаються імовірнісними величинами. Так як вони малі в порівнянні з канонічними, то в подальших розрахунках їх не враховують.

На основі трифазної мостової схеми будуються різні перетворювачі з покращеними характеристиками. Наприклад, напівкерований мостовий перетворювач забезпечує зменшення в два рази фазового кута зсуву першої гармоніки мережевого струму щодо напруги $\varphi_1 = \alpha/2$, де α - кут управління вентилями. Такі перетворювачі знаходять застосування в нереверсивних електроприводах, системах збудження синхронних машин, у зварювальних агрегатах та ін.

Несиметричне управління вентилями анодної і катодної груп викликає появу у фазних струмах як непарних, і парних гармонік. Слід зазначити, що при живленні від загальних шин двох однакових несиметричних мостових перетворювачів доцільно включати керовані вентиля в одному перетворювачі в анодну групу, в іншому – у катодну. Парні гармоніки в мережному струмі в цьому у разі компенсуються.

При розрахунку вищих гармонік струмів дванадцятифазних перетворювачів слід враховувати зсув фаз однойменних гармонік у частинах вентиляльних обмоток, що мають різні схеми з'єднання (трикутник та зірка): струми гармонік з номерами $n = 12q + 1$ ($q = 0, 1, 2, \dots$) збігаються по фазі, а з номерами $n = 6q + 1$ ($q = 1, 3, 5, \dots$) знаходяться у протифазі та взаємно компенсуються. Отже, багатомостові перетворювачі покращують гармонійний склад струмів за рахунок компенсації 5, 7 гармонік [5].

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Силові трансформатори є джерелами вищих гармонік струму, що намагнічує. За рахунок несиметрії магнітопроводу трифазних тристержневих трансформаторів діючі значення намагнічувальних струмів крайніх фаз в 1,3...1,35 рази більше намагнічуючого струму середньої фази. Тому в струмах, що намагнічують є всі непарні гармоніки. Найбільші, крім першої, - це 3, 5, 7 гармоніки.

При зростанні напруги понад номінальну на 3...5 % рівень гармонік струму, що намагнічує, зростає в 1,5...2 рази. При великій встановленій потужності трансформаторів підстанцій це може призвести до помітного збільшення напруги вищих гармонік у мережі.

Випрямлячі електрорухомого складу мають нелінійні вольтамперні характеристики і генерують в мережу живлення вищі гармоніки, які обумовлюються процесом комутації струму у вентилях, спотворенням форми кривої первинного струму, струмом трансформатора, що намагнічує, а також кутом регулювання керованих випрямлячів [6].

Крива струму первинної обмотки тягового трансформатора ЕРС i_1 (струму споживаного з мережі) залежить від типу вхідного перетворювача і характеру тягового навантаження. Форма кривої струму несинусоїдальна. Крива первинного струму i_1 містить основну гармоніку $i_{1(1)}$ з частотою мережі 50 Гц і деякий спектр вищих гармонійних складових. При розкладанні кривої струму i_1 в ряд Фур'є отримано, що в ній відсутня постійна складова та косинусні складові, а в синусної складової є тільки непарні гармонійні складові. З проведених досліджень [7] впливає, що в кривій струму i_1 крім першої гармоніки міститься ряд вищих непарних гармонійних, старша ($n = 3$) та наступні ($n = 5, 7, 9, \dots$) тобто $n = 2k \pm 1$.

Амплітуди вищих гармонійних обернено пропорційні їх порядковому номеру:

$$I_{1m(n)} = \frac{I_{1m(1)}}{n},$$

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

де n – номер вищої гармонійної.

У табл. 1.3 наведено вміст вищих гармонійних струму мережі $i_{1(1)}$ (ефективне значення).

Таблиця 1.3 – Ефективні значення вищих гармонійних складових струму мережі

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$f(n)$, Гц	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	100	105	110	115	120	125
$I_{m(1)} / n$, %	-	33	-	20	-	14	-	11	-	9	-	8	-	7	-	6	-	5	-	5	-	4	-	4

В таблиці 1.3 $f(n)$ – частота; $I_{m(1)}/n$ – вміст вищих гармонійних струму мережі.

Ефективне значення струму первинної обмотки тягового трансформатора (мережі):

$$I_1 = \sqrt{(I_{1(1)})^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{1(n)})^2}.$$

Наявність вищих гармонійних складових призводить до зростання ефективного струму в мережі живлення, що викликає додаткові втрати енергії в живлячій системі.

Загальна закономірність вмісту вищих гармонійних в реальній кривій первинного струму полягає в тому, що при ідеальному згладжуванні струму I_d зі збільшенням кута комутації γ , значення вищих гармонійних знижується, а збільшення кута управління α призводить до зростання амплітуди вищих гармонійних [8].

1.3 Вплив вищих гармонік на елементи системи електропостачання

Вплив, що робиться нелінійними та/або несиметричними навантаженнями тягових і нетягових споживачів та поява вищих гармонік призводять до виникнення значної кількості негативних процесів, які впливають на показники

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ										Арк.	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата											16	

якості електроенергії та здатні поширюватися по мережі електропостачання на значні відстані від безпосереднього джерела спотворень.

1.3.1 Втрати від найвищих гармонік в електричних машинах

Вищі часові гармоніки струму викликають додаткові втрати в обмотках електричних машин. Додаткові втрати сталі машин малі та зазвичай ними нехтують.

Основна частина додаткових втрат у синхронних машинах приходить на обмотку статора і демпферну систему. В асинхронних двигунах високої напруги втрати в обмотках статора та ротора приблизно однакові.

Оцінюючи величину відносних втрат, неважко помітити, що вони мають найбільше значення для гармонік низького порядку, насамперед, другого та третього. Втрати від гармонік вище 13-ї малі і ними можна знехтувати [9].

Досліди показують, що навіть у випадках неприпустимих спотворень ($K_i = 10...15\%$), додаткові втрати від тимчасових гармонік у СД з шихтованим статором і ротором не перевищують кілька відсотків номінальних втрат. Тому перегрів явно полюсних синхронних двигунів із шихтованими полюсами на практиці не спостерігається.

Втрати від вищих гармонік у СД із масивними полюсами виявляються значно більшими. Те саме стосується синхронних компенсаторів. Робота машин з масивними полюсами від несинусоїдальної напруги небезпечна, тому що може перегрітися і вийти з ладу обмотка збудження.

На підприємствах, як показали обстеження, перегрів асинхронних електродвигунів у мережах навіть із більшим рівнем вищих гармонік ($K_i = 10...15\%$) не спостерігався при номінальному навантаженні, ні за зниженому.

1.3.2 Втрати потужності у трансформаторах

Втрати активної потужності від струмів вищих гармонік у трансформаторах визначаються як:

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2} I_n^2 R_K K_{nm}, \quad (1.1)$$

де I_n - струм n -ї гармоніки, що проходить через трансформатор;

R_K – опір к. з. трансформатора при номінальній частоті;

K_{nm} - коефіцієнт, що враховує збільшення опору к. з. для вищих гармонік за рахунок поверхневого ефекту та ефекту близькості. Для силових трансформаторів можна прийняти $K_{5m} = 2,1$; $K_{7m} = 2,5$; $K_{11m} = 3,2$; $K_{13m} = 3,7$.

З формули (1.1) видно значне збільшення втрат активної потужності в трансформаторі при наявності та збільшенні струмів вищих гармонік.

1.3.3 Вплив найвищих гармонік на ізоляцію

Спотворення форми кривої напруги помітно позначається на виникненні та перебігу іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин та трансформаторів. За наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація, сутність якої полягає в утворенні об'ємних зарядів і подальшої їх нейтралізації. Нейтралізація зарядів пов'язана з розсіянням енергії, наслідком якого є електричний, механічний і хімічний вплив на діелектрик. Внаслідок чого розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до зниження її електричної міцності, зростання діелектричних втрат і, зрештою, до скорочення терміну служби.

Кількість розрядів у газових включеннях залежить від форми кривої напруги, що подається на ізоляцію.

Дослідження показують, що за однакових амплітуд кривих напруги $tg\delta$ буде більшим для кривої загостреної форми і меншим для сплющеної кривої (порівняно з синусоїдальною) [9]. Ці відмінності будуть не настільки великі, якщо зробити порівняння з однаковими діючими значеннями тих же кривих напруги.

Практика показує, що за рахунок вищих гармонік криві напруги в промислових мережах найчастіше набувають більш загостреної форми, тому

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

наявність вищих гармонік призводить до прискореного старіння ізоляції електричних машин та трансформаторів.

За наявності вищих гармонік в мережі живлення процес старіння діелектрика конденсаторів протікає також більш інтенсивно порівняно з роботою їх при синусоїдальній напрузі. Це обумовлено тим, що фізико-хімічні процеси в діелектриках, що зумовлюють їх старіння, значно прискорюються при високих частотах. Аналогічно впливає додаткове нагрівання, викликане протіканням вищих гармонік струму.

Дослідження показали, що, наприклад, при коефіцієнті несинусоїдності напруги 5 %, що допустимо, згідно з ГОСТ, через 2 роки експлуатації $\text{tg}\delta$ конденсаторів збільшується у 2 рази.

При несинусоїдальній напрузі мережі відбувається прискорене старіння ізоляції силових кабелів. Для підтвердження цього були зіставлені результати вимірів струмів витоку кабелів, що працюють майже в однакових навколишніх умовах. Частина обстежених кабелів працювала при практично синусоїдальній напрузі, інша - при рівні гармонік у кривій напруги в межах 6...8,5% (переважали 5-а та 7-я гармоніки). Струми витоку в другому у випадку через 2,5 роки експлуатації виявилися в середньому вище на 36 %, а через 3,5 року на 43 % вище, ніж у першому випадку.

1.3.4 Вплив найвищих гармонік на облік електроенергії

Прилади обліку електроенергії при несинусоїдальних струмах і напругах дають велику похибку. Зокрема, поширені індукційні лічильники мають негативну частотну похибку на частотах вищих гармонік.

Результуюча похибка обліку електроенергії, зумовлена несинусоїдністю, дорівнює:

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{n=2}^n \frac{\Delta P_n}{P_1} \gamma_n, \quad (1.2)$$

де ΔP_n - потужність на частотах n-ї гармоніки;

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

P_1 - потужність на частотах першої гармоніки;

γ_n - похибка для n-ї гармоніки.

З формули (1.2) видно, що при збільшенні рівня потужності гармонійних складових результуюча похибка обліку електроенергії також збільшується.

Таким чином, за наявності нелінійних електроприймачів відбувається "переоблік" електроенергії. Наприклад, при великих спотвореннях напруги $K_{\text{нCU}} = 7...10 \%$, похибка вимірювання може досягати $4...6 \%$ [10].

Найбільший вплив на похибку індукційних лічильників мають 11 та 13 гармоніки. Похибки обліку призводять до порушення балансу споживаної електроенергії через облік електроенергії різної якості.

Велику точність виміру електроенергії в умовах несинусоїдальних режимів забезпечують електронні лічильники.

Вимірювання напруги та струму за наявності вищих гармонік також призводить до додаткових похибок.

Вищі гармоніки також погіршують роботу систем автоматики та телемеханіки, негативно впливають на релейний захист силового обладнання, викликаючи помилкові та некоректні спрацьовування, та зменшують надійність систем електропостачання.

1.4 Вплив вищих гармонік на ділянці електрифікованої залізниці

На ділянках електрифікованої залізниці електровози, що мають нелінійні вольтамперні характеристики випрямних агрегатів, генерують в тягову мережу вищі гармоніки струму, які можуть проникати у зовнішні мережі та райони електропостачання нетягових споживачів. Перебіг струмів вищих гармонік супроводжується такими негативними ефектами:

- негативно впливає, на пристрої провідного зв'язку в результаті електромагнітної індукції;
- приводить до збільшення втрат активної потужності в пристроях електропостачання;

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- виникають додаткові втрати напруги, які приводять до несиметрії і спотворенні форми кривої напруги, що підводиться до електроустановок які отримують живлення від даної енергосистеми;

- спотворення форми кривої напруги викликає збільшення нагріву асинхронних і синхронних електродвигунів, а також синхронних компенсаторів, що у ряді випадків може приводити до необхідності збільшення їх встановленої потужності;

- додаткове нагрівання ізоляції обмоток трансформаторів, що призводить до скорочення строку їхньої служби;

- прискорене теплове старіння ізоляції обмоток статора асинхронних електродвигунів;

- додатковий нагрів генераторів електростанцій живлячої системи;

- виникнення додаткової похибки вимірювання електроенергії; вона може призвести до результуючої похибки, що перевищує допустимі значення;

- обрив нейтрального дроту внаслідок відгоряння контакту при значному рівні гармонік із номерами, кратними трьом; це може призвести до виходу з ладу окремих електроприймачів через появу підвищених напруг на їх затискачах;

- резонансні ефекти на частотах найвищих гармонік, що створюють серйозні проблеми для електроустаткування;

- знижується надійність електропостачання.

Тому завдання зниження рівнів гармонічних спотворень у мережах, що примикають до тягових підстанцій залізниць змінного струму, має велику актуальність.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИБОРІВ

2.1 Особливості системи тягового електропостачання змінного струму

Системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць являють собою складні електротехнічні комплекси та мають значний вплив на мережі зовнішнього електропостачання, системи зв'язку, автоматики та телемеханіки. Особливості СТЕ - низький коефіцієнт потужності та значні спотворення форми струмів та напруг. Компенсація реактивної потужності та підвищення якості електроенергії є одним з основних напрямків по зниженню втрат у СТЕ. Завдання забезпечення якості електроенергії стає ще більш актуальним в умовах зростання швидкостей руху, збільшення вантажопотоку та вимог, що посилюються з боку енергопостачальних організацій.

Системи тягового електропостачання змінного струму мають ряд особливостей, які визначають вимоги до функцій та характеристик фільтрокомпенсуючих пристроїв, що встановлюються в тягових мережах.

Перша особливість полягає в тому, що електрорухомий склад змінного струму є однофазним нелінійним навантаженням. Значна кількість локомотивів, що експлуатуються на вітчизняних залізницях, оснащені двонапівперіодними випрямляючими установками та колекторними тяговими двигунами. У спектрі струму, що споживається електрорухомим складом (ЕРС), переважають низькочастотні непарні гармоніки (3-я, 5-а та 7-ма) [11]. Несинусоїдальні струми викликають спотворення напруг як у тяговій мережі, так і у зовнішніх мережах 110 і 220 кВ, що живлять тягові підстанції.

Інша особливість СТЕ полягає в тому, що на частотах гармонік високого порядку необхідно враховувати розподіл параметрів протяжної контактної мережі. Хвильові процеси у тяговій мережі супроводжуються резонансними явищами, які можуть спричинити перенапруги на струмоприймачах ЕРС [12]. Крім того тягова мережа має значний електромагнітний вплив на пристрої зв'язку, автоматики та телемеханіки, чутливе електронне обладнання.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Третя особливість – нестационарний характер тягових навантажень, що викликається зміною режиму роботи ЕРС, його переміщення. Змінні навантаження викликають значні коливання активної та реактивної потужностей. Для досягнення найбільш економічного режиму роботи системи тягового електропостачання необхідна динамічна компенсація реактивної потужності залежно від величини тягового навантаження.

Таким чином, для забезпечення електромагнітної сумісності ЕРС із системою електропостачання, ланцюгами живлення пристроїв зв'язку, автоматики та телемеханіки необхідні компенсуючі пристрої, основні функції яких полягають у наступному [13]:

- регулювання реактивної потужності залежно від величини тягового навантаження;
- придушення потужних низькочастотних гармонік;
- демпфування резонансних явищ, викликаних хвильовими процесами в тяговій мережі;
- ослаблення високочастотних гармонік струму для зниження рівня кондуктивних та електромагнітних перешкод.

Відповідно до вимог нормативних документів встановлення поперечної ємнісної компенсації для систем тягового електропостачання повинні виконуватися у вигляді фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП), які здійснюють компенсацію реактивної потужності та придушення вищих гармонік струму та напруги.

2.2 Активні та пасивні фільтри

У тяговій мережі пасивні фільтри (рис. 2.1) діляться на вузькосмугові (настроєні) і широкосмугові (гасячі). Принцип фільтрації пасивних фільтрів заснований на залежності опорів їх елементів від частоти струмів, що протікають в них, і зазвичай на використанні явищ резонансу в паралельних і послідовних ланцюгах, що містять конденсатори і реактори.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

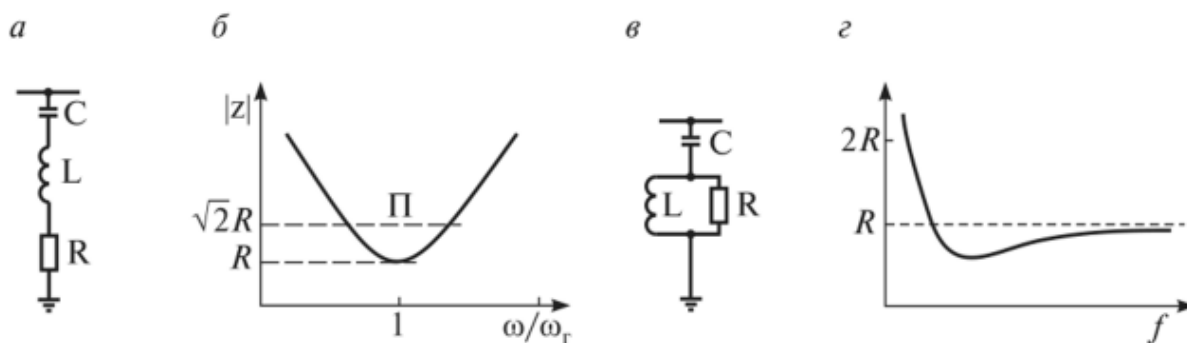


Рисунок 2.1 – Схеми вузькосмугового (а) та широкосмугового (в) фільтрів;
частотні характеристики вузькосмугового (б) та широкосмугового (г) фільтрів

Як показано на рис. 2.1 б, смуга пропускання Π частот вузькосмугового фільтра обмежена частотою, на якій опір фільтра дорівнює його активному опору, і частотою, на якій модуль повного опору дорівнює $\sqrt{2}R$.

Зі зростанням добротності крутість залежності повного опору від частоти зростає, а смуга пропускання щодо резонансної частоти стає вужчою. Наслідком цього є виникнення протиріч у вимогах до фільтрів, насамперед у статичних режимах роботи. З одного боку, зростання добротності підвищує ефективність фільтрації вищих гармонік на частоті налаштування фільтра, з іншого боку, зростає негативний вплив відхилень від частоти настроювання. Такі відхилення виникають у результаті старіння елементів фільтра, зміни температури навколишнього середовища тощо.

Більш того, при будь-яких перехідних процесах в системі тягового і зовнішнього електропостачання виникають значні відхилення напруг і струмів від їх значень, що встановилися. Зазначене визначає застосування у ряді випадків широкосмугових фільтрів зі зниженою добротністю (рис. 2.1, г) [14].

Широкасмугові фільтри мають такі переваги:

- меншу чутливість до зміни температури, відхилень частоти, промислових допусків на виготовлення елементів, втрат у ємнісних елементах тощо;

- малий опір широкому спектру гармонік, відсутність необхідності розбивки фільтра на паралельні гілки, що викликають утруднення при перемиканні та обслуговуванні;

- зручність застосування у випадку, якщо використання налаштованих фільтрів викликає появу резонансу струмів між провідностями фільтра або на гармоніках, що лежать між налаштованими частотами.

Основні недоліки широкосмугових фільтрів:

- для отримання однакового рівня фільтрації вони повинні бути розраховані на більш високу потужність, хоча в більшості випадків хороша робота фільтра здійснюється в діапазоні, який потрібний для регулювання коефіцієнта потужності;

- втрати в опорі та реакторі набагато вищі.

На практиці знайшли застосування такі чотири типи гасячих фільтрів: першого порядку (рис. 2.2, а), другого (рис. 2.2, б), третього (рис. 2.2, в) і С-фільтрів (рис. 2.2, г).

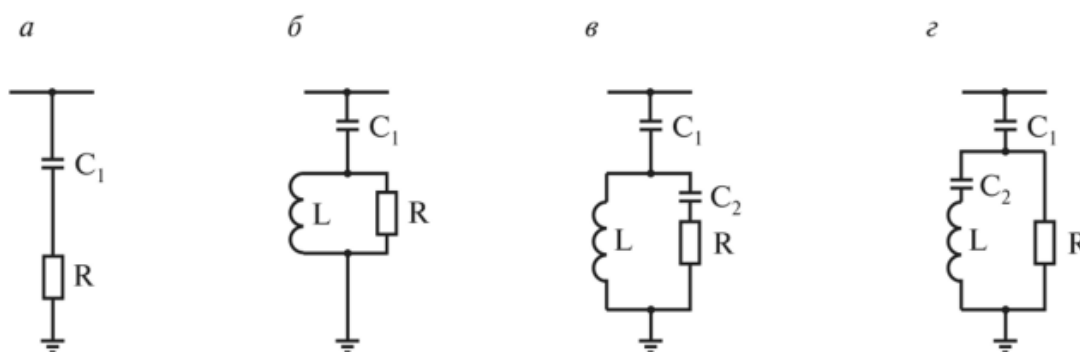


Рисунок 2.2 – Типи широкосмугових фільтрів

Фільтр першого порядку застосовується рідко, тому що для нього потрібний конденсатор великої потужності, а втрати на основній частоті великі. Фільтр другого порядку зручний в експлуатації, але втрати на основній частоті, порівняно з фільтром третього порядку, також великі. Головною перевагою фільтра третього порядку є малі втрати на основній частоті, пов'язані зі збільшенням повного опору на цій частоті, викликаним наявністю конденсатора C_2 . Ємність конденсатора C_2 набагато менше ємності C_1 . Фільтр С-типу займає

положення між фільтрами другого та третього порядків. Основною його перевагою є суттєво менші втрати на основній частоті через те, що на цій частоті С2 та L налаштовані на послідовний резонанс [14].

З розвитком елементної бази електроніки розроблені активні (силові) фільтри (на транзисторах і тиристорах, що замикаються), що є перетворювачами для фільтрації, які дозволяють керувати частотними характеристиками фільтра. Активні фільтри генерують несинусоїдальний струм/напругу, що компенсують вихідні значення цих струмів/напруг. У системі тягового електропостачання активні силові фільтри не застосовують через високу вартість. Проте останніми роками з'явилися розробки різних методів управління пасивними фільтрами з урахуванням застосування активних фільтрів, що виконують роль виконавчого органу регулятора параметрів пасивного фільтра. При цьому встановлена потужність активної частини знижується більш ніж на порядок порівняно з активним фільтром, що позначається на вартісних характеристиках. Фільтр, виконаний на основі пасивного фільтра з активною частиною, подібною до активного фільтра, прийнято називати гібридним.

Активні та гібридні ФКП, що забезпечують плавне регулювання реактивної потужності в системах тягового електропостачання, одержали назву кондиціонерів тягової мережі.

Основний недолік активних та гібридних силових фільтрів для систем тягового електропостачання полягає в тому, що вони дорогі, вимагають кваліфікованого обслуговування та спеціальної підготовки персоналу [15]. У більшості випадків роботи зі створення кондиціонерів тягової мережі поки що обмежені дослідженням експериментальних моделей.

На сьогоднішній день існують проекти регульованих ФКП для систем тягового електропостачання, що складаються з паралельно включених реактора з тиристорним керуванням (РТК) та пасивного фільтрокомпенсуючого пристрою. Пасивний ФКП містить вузькосмуговий фільтр, налаштований на частоту третьої гармоніки, та широкосмуговий фільтр першого порядку. Реактивна потужність

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

компенсуючого пристрою дорівнює різниці потужностей пасивного фільтра та РТК.

Техніко-економічний аналіз показує, що застосування ФКП з плавним регулюванням реактивної потужності у системах тягового електропостачання потребує значних капітальних вкладень. У зв'язку з цим більш вигідно використовувати у тягових мережах вітчизняних залізниць простіші ФКП, що забезпечують східчасте (дискретне) регулювання реактивної потужності шляхом включення або відключення окремих ланок. Однак комутація вузькосмугових резонансних ланок може викликати кидки струму та напруги в тяговій мережі. Крім того, такі ланки утворюють високودобротні паралельні контури з індуктивністю тягової мережі, які можуть викликати резонансне посилення окремих гармонік. Тому в регульованих ФКП як комутовані секції доцільно використовувати широкосмугові фільтри (ШСФ) невисокої добротності.

Існують нові варіанти регульованих ФКП для систем тягового електропостачання, в яких в якості секцій використовуються широкосмугові фільтри 3-5 порядку [16]. Дані ФКП мають малі втрати на основній частоті гармоніки та забезпечують електромагнітну сумісність електрорухомого складу з тяговою мережею, пристроями дротового та радіозв'язку, ланцюгами живлення пристроїв автоматики та телемеханіки. Вони можуть використовуватися в компенсуючих пристроях з дискретним або плавним регулюванням реактивної потужності.

Дані регульовані ФКП складаються із двох секцій. Низькочастотна секція представляє вузькосмугову ланку, налаштовану на частоту, близьку частоті найпотужнішої третьої гармоніки (145 Гц). Другу (комутовану) секцію реалізує широкосмуговий фільтр, що здійснює ослаблення високочастотних гармонік, починаючи з 5-ї, та демпфування резонансних явищ у тяговій мережі. Ступінчасте регулювання реактивної потужності пристрою здійснюється шляхом увімкнення (відключення) широкосмугової секції.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

При необхідності плавного регулювання реактивної потужності до складу ФКП може бути додатково включений модуль, що має змінний реактивний опір (наприклад, реактор з тиристорним управлінням).

На сьогоднішній день перспективними являються широкосмугові фільтри, схема яких показана на рис. 2.3, а, б. Фільтр є односторонньо навантажений LC-чотириполіусник сходової структури [17]. Компенсуючий пристрій включає вузькосмугову ланку, налаштовану на придушення 3-ї гармоніки, і широкосмуговий фільтр 3-го або 5-го порядку.

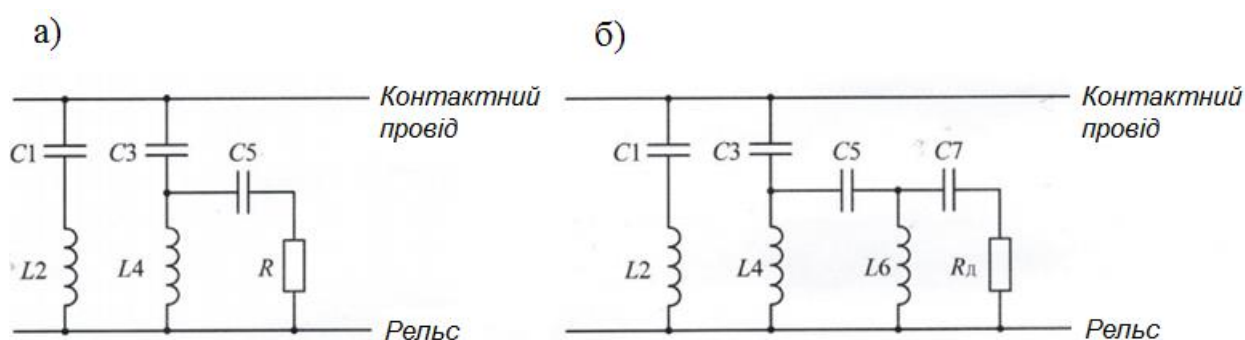


Рисунок 2.3 – ФКП з широкосмуговими фільтрами третього (а) та п'ятого (б) порядку

Широкосмугові фільтри для тягових мереж повинні виконувати такі функції:

1. Ослаблення вищих гармонік струмів та напруг.
2. Демпфування резонансних явищ у тяговій мережі.
3. Забезпечення малих втрат в елементах фільтра на основній частоті.
4. Обмеження кидків струму та напруги при комутаціях. Для цього ШСФ повинен мати невисоку добротність.

2.3 Схемотехнічний склад нового ФКП

Для оцінки параметрів ФКП визначимо значення підвищення напруги при включенні ФКП до тягової мережі:

$$\Delta U = I_{ФКП} X_{вх}, \quad (2.1)$$

де $I_{ФКП}$ – струм ФКП;

$X_{вх}$ – сумарний вхідний опір до точки підключення ФКП, що в загальному випадку враховує опір системи зовнішнього електропостачання, трансформаторів тягових підстанцій та тягову мережу.

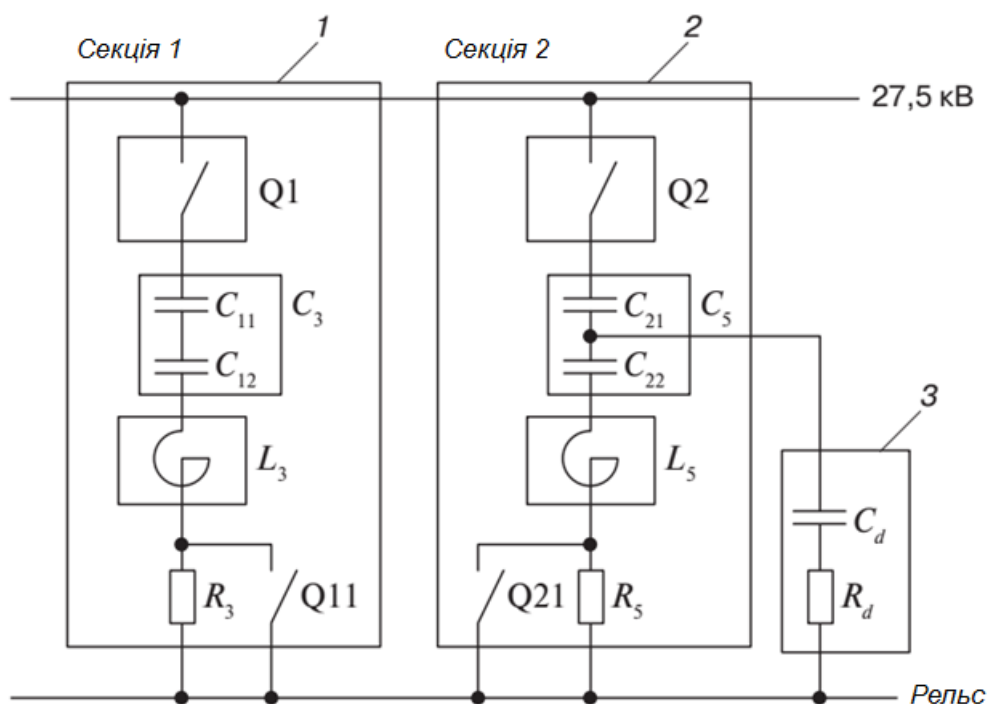
Приймаючи для ФКП поста секціонування при двосторонньому живленні тягової мережі $X_{вх}=6...8$ Ом, у відповідності з формулою (2.1) отримаємо, що напруга при відсутності навантаження в тяговій мережі підвищується на 1500 В при струмі $I_{ФКП} = 150...185$ А. Це означає, що за потужності ФКП від 4 Мвар (номінальний струм 150 А) до 5 Мвар (номінальний струм 185 А) та при номінальній напрузі на шинах тягової підстанції 27,5 кВ напруга тягової мережі становитиме гранично допустиме значення - 29 кВ. Таким чином, потужність нерегульованих ФКП має становити не більше 5 Мвар.

При необхідності включати більшу потужність ФКП слід формувати багатосекційні ФКП з можливістю регулювання потужності установки шляхом підключення (відключення) секцій ФКП. Так як найбільші значення гармонійних складових мають третя і п'ята гармоніки, то для забезпечення нормативних значень сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруги, як правило, достатня фільтрація 3-ї та 5-ї гармонійних складових напруги. Тому переважно застосування ФКП, що складається з двох секцій: при цьому секція 1 повинна бути виконана з налаштуванням резонансу на частоту 3-ї гармоніки (150 Гц), а секція 2 - на частоту 5-ї гармоніки (250 Гц).

Можливість виникнення резонансних явищ між індуктивністю контактної мережі та її ємнісною провідністю, особливо при односторонньому живленні тягової мережі та малої потужності короткого замикання на введенні підстанції (300...500 МВ·А), змушує застосовувати широкосмугові фільтри з демпфуючими ланцюгами (ДЛ) C_d-R_d . ДЛ підключається до точки нульового потенціалу напруги 50 Гц обраної секції з метою недопущення протікання струму основної частоти через резистор. У ланцюг резистора включений конденсатор для зниження активних втрат потужності.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Розглянуті схемні варіанти, а також перелік завдань, які розв'язують ФКП, свідчать про необхідність модульної побудови ФКП. Залежно від конкретних завдань для тієї чи іншої тягової підстанції або поста секціонування формується набір модулів ФКП, що включаються: секції ФКП (модулі 1 і 2), а також демпфуючі ланцюги (модуль 3), що показано в новій схемі двосекційної ФКУ на рис.2.4.



1 – модуль секції 1; 2 – модуль секції 2; 3 – модуль демпфуючого ланцюга

Рисунок 2.4 – Нова схема двосекційної ФКУ з демпфуючим ланцюгом

Відмінні риси нової схеми ФКП полягають у наступному:

1. Уточнено значення опорів пускових резисторів R_3 , R_5 . Результати розрахунків (із застосуванням цифрової моделі) перехідних процесів при комутації секцій ФКП свідчать, що прийняте раніше значення опорів пускових резисторів - 80 Ом має бути зменшено до 40 Ом в секції 1 і до 60 Ом-в секції 2. Застосування резисторів із зазначеними опорами знижує кидки струму і напруги при комутації секцій ФКП, що дозволяє перейти на регульований режим секцій обмеженою кількістю їх перемикачів.

2. Приймаючи справедливим облік резонансних явищ у секціях і враховуючи значні втрати потужності в резисторі, з метою зниження значних втрат пропонується демпфуючий ланцюг включати тільки до секції 250 Гц, де чинне значення струмів гармонічних складових менше, ніж у секції 150 Гц, у 2 рази та більше. Навіть якщо немає необхідності увімкнення секції з резонансним налаштуванням на 250 Гц, то для включення демпфуючого ланцюга монтують секцію на 250 Гц.

3. Як видно з рис. 2.4, демпфуючий ланцюг підключений без комутаційного апарату. Нова схема двосекційного ФКП відрізняється від раніше застосовуваних тим, що з метою зниження втрат потужності та спрощення схемного рішення широкосмуговий фільтр підключений без комутаційного апарату тільки до секції 250 Гц.

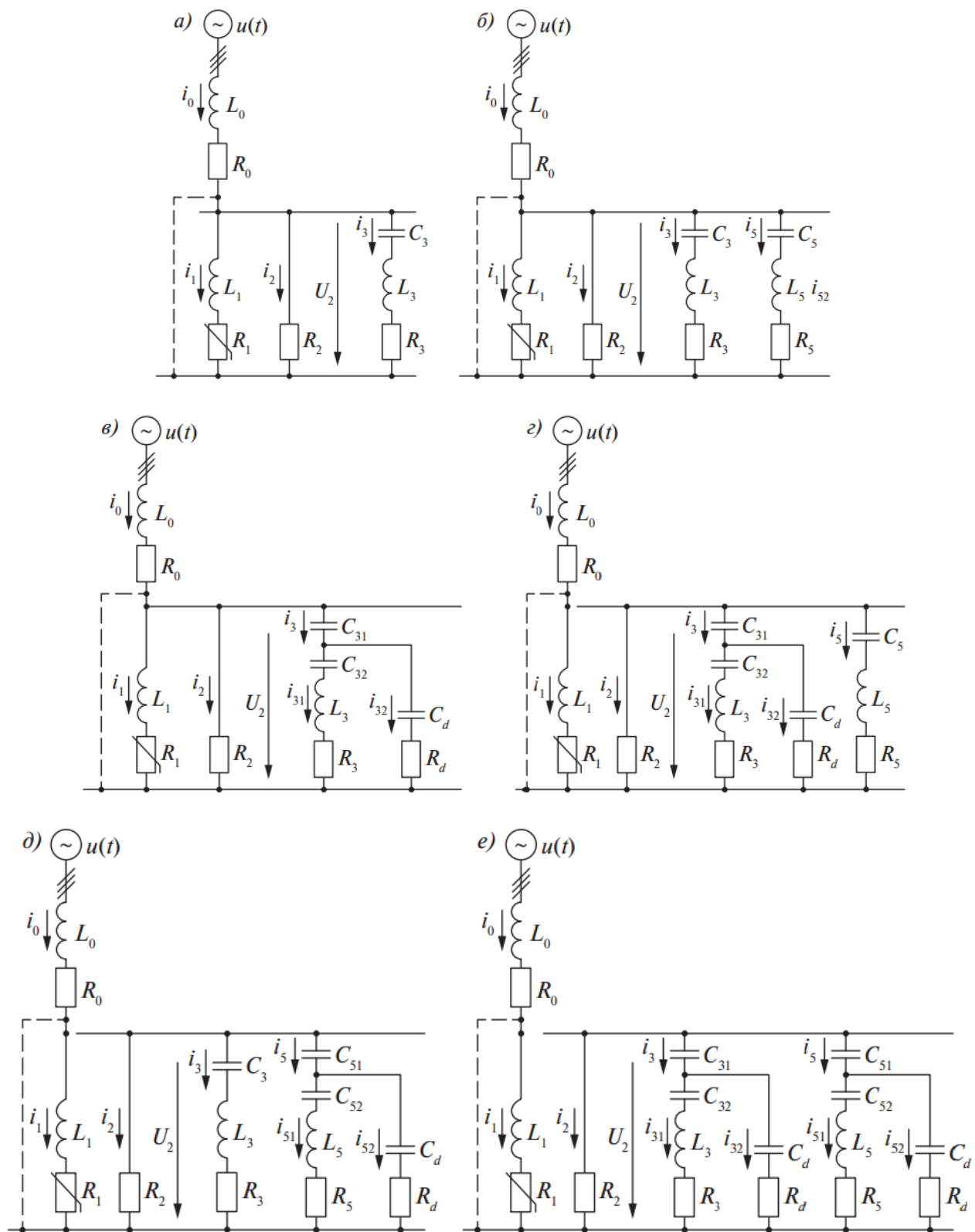
4. Як комутаційні апарати Q11 і Q21 застосовані однофазні вакуумні вимикачі на 10 кВ.

2.4 Аналіз показників несинусоїдності напруги в тягових мережах при застосуванні ФКП різних конфігурацій

Різноманітні варіанти схем ФКП підключених до шин тягових підстанцій, які використовуються для зниження несинусоїдності представлено на рис. 2.5.

За допомогою системи MathCad виконано розрахунок струмів та напруг за цифровою моделлю та розкладання їх на гармонійні складові, визначено значення коефіцієнтів гармонійних складових $K_{U(n)}$. При моделюванні електромагнітних процесів враховано тягові навантаження в зоні живлення тягової підстанції [18]. Отримані значення коефіцієнтів гармонійних складових напруги представлені у табл. 2.1. В таблиці також вказано для порівняння нормовані значення показників несинусоїдності, а також видно, що зі збільшенням тягового навантаження збільшуються значення коефіцієнтів гармонійних складових, і вже за тягового навантаження більше 300 А показники несинусоїдності перевищують допустимі значення (див. табл. 2.1).

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



а - односекційна ФКП; б - двосекційна ФКП; в - односекційна ФКП з ДЛ;
 г - двосекційна ФКП з ДЛ у секції 1; д - двосекційна ФКП з ДЛ у секції 2;
 е - двосекційна ФКП з ДЛ у двох секціях

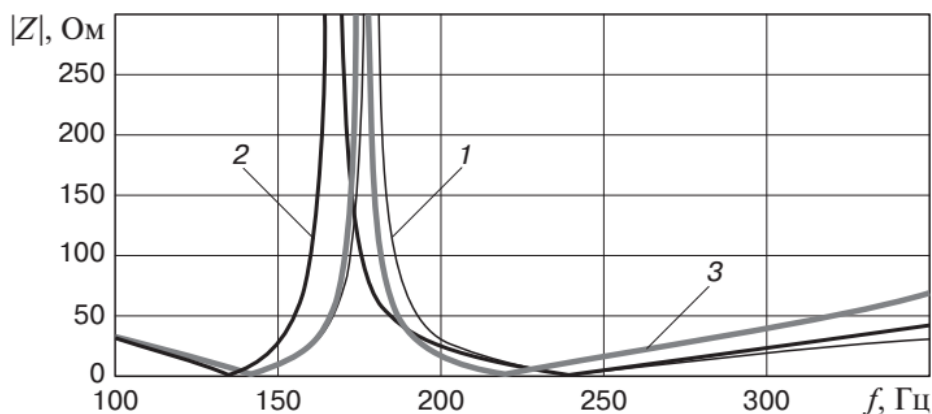
Рисунок 2.5 – Схеми заміщення схемотехнічних варіантів ФКП

Таблиця 2.1 – Показники несинусоїдності напруги в тяговій мережі без підключення ФКП та при підключенні ФКП різних конфігурацій

Варіант	Схема	Дійсне значення струму тягового навантаження	Коефіцієнти гармонійних складових			
			$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	K_U
Допустимі значення $K_{U(n)}$, % протягом 95% часу для напруги 25 (110) кВ			3(1,5)	4(1,5)	3(1)	5(2)
1	Без підключення ФКП	150	3,45	2,7	2,06	5,21
		300	6,75	4,93	3,47	9,55
		450	9,84	6,75	4,42	13,36
2	Односекційна ФКП (150 Гц), (рис. 4, а)	150	0,51	1,44	1,26	2,36
		300	1,02	2,78	2,33	4,38
		450	1,54	4,06	3,24	6,17
3	Двосекційна ФКП (150 та 250 Гц), (рис. 4, б)	150	1,03	0,34	0,9	1,76
		300	2,08	0,68	1,72	3,36
		450	3,17	1	2,46	4,88
4	Односекційна ФКП (150 Гц) з ДЛ, (рис. 4, в)	150	3,76	3,2	2,57	5,96
		300	7,33	5,81	4,22	10,79
		450	10,73	7,89	5,25	15
5	Двосекційна ФКП 2×150 Гц з ДЛ у секції 1, (рис. 4, г)	150	0,649	1,86	1,77	3,19
		300	1,298	3,56	3,19	5,78
		450	1,96	5,14	4,34	7,96
6	Двосекційна ФКП з ДЛ у секції 150 Гц, (рис. 4, г)	150	1,17	0,36	1,07	2,1
		300	2,36	0,69	2,03	3,97
		450	3,59	1,03	2,89	5,68
7	Двосекційна ФКП з ДЛ у секції 250 Гц, (рис. 4, д)	150	0,90	0,31	0,92	1,74
		300	1,81	0,62	1,74	3,29
		450	2,74	0,91	2,49	4,71
8	Двосекційна ФКП з ДЛ у двох секціях, (рис. 4, е)	150	3,12	1,54	1,78	4,24
		300	6,205	2,94	3,14	8,01
		450	9,21	4,16	4,12	11,42

Введення демпфуючих ланцюжків (ДЛ) зміщує частотні характеристики «вліво» (рис. 2.6, криві 2 і 3 зміщені «вліво» щодо кривої 1), тим самим

погіршивши фільтруючі властивості ФКП. Тому при включенні ДЛ коригують резонансні частоти фільтрів для того, щоб вони відповідали нормованим значенням показників несинусоїдності. У табл. 2.1 для схем із ДЛ представлені результати розрахунків, зроблених з урахуванням зазначеного коригування резонансних частот.



1 - без підключення ДЛ; 2 - з підключенням ДЛ в секцію 1, налаштовану на 3-ю гармоніку; 3 - з підключенням ДЛ у секцію 2, налаштовану на 5-ю гармоніку

Рисунок 2.6 – Частотні характеристики двосекційної ФКП при різних варіантах підключення ДЛ

Як видно з табл.2.1, підключення двосекційної установки за схемою, представленою на рис.2.5, б знижує величину несинусоїдності напруги до допустимих значень. При невеликих тягових навантаженнях можливе застосування односекційної ФКП (рис. 2.5, а).

Найкращі показники зниження фільтрованих гармонік напруги досягаються при використанні схем (рис. 2.5, г, д) при включенні ДЛ в секцію 150 або 250 Гц. При цьому для схеми (рис. 2.5, г) показники несинусоїдальності напруги знаходяться в межах допустимих значень тільки при тяговому навантаженні до 300 А.

Вказані розрахунки проілюстровані на рис. 2.7, де видно, що найкращі результати зниження гармонік напруги $K_{U(n)}, \%$, досягаються при наступних варіантах схем - 3, 6 і 7.

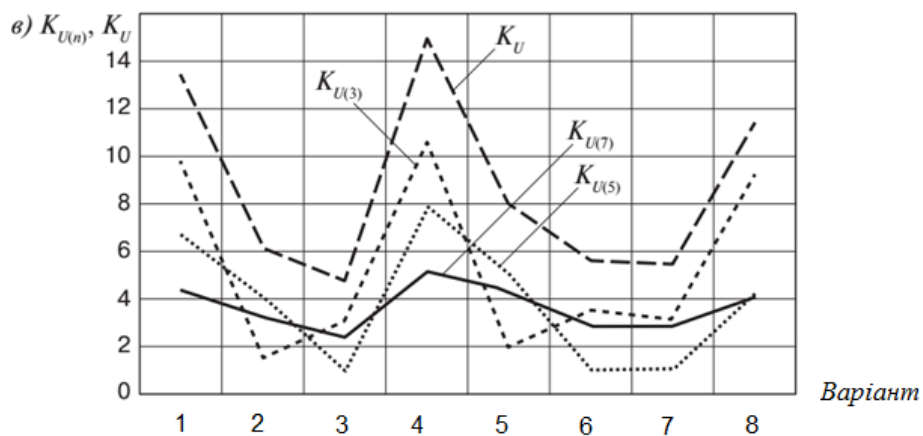
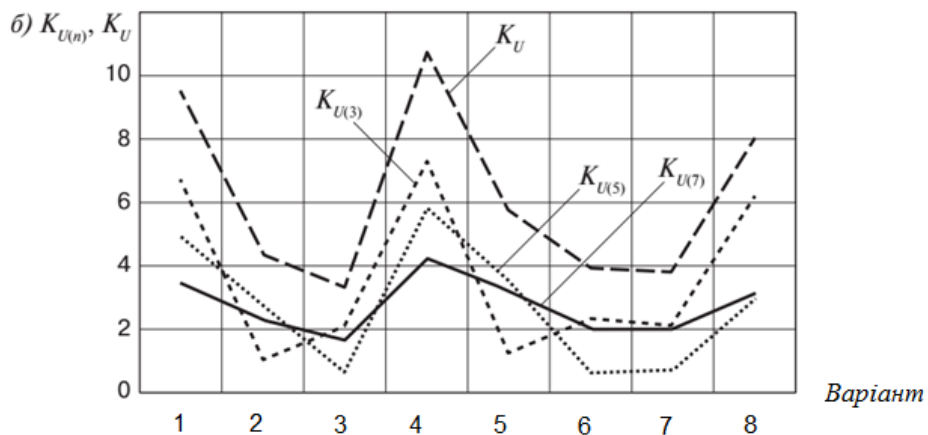
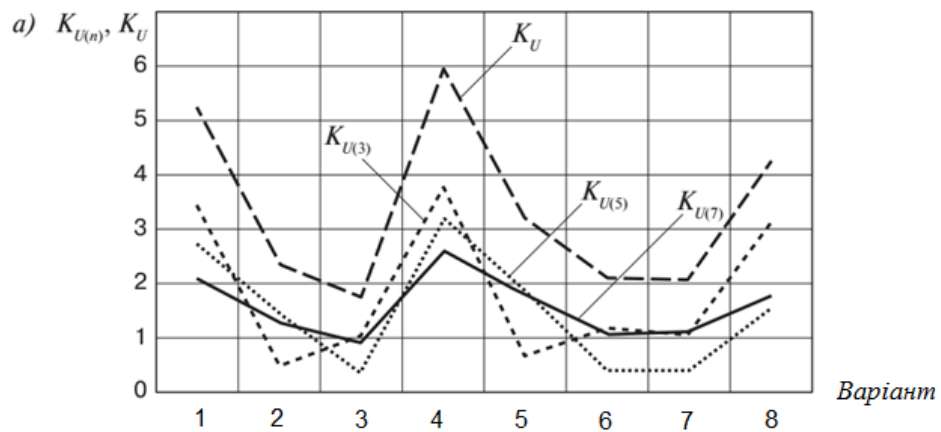


Рисунок 2.7 – Значення коефіцієнтів гармонійних складових напруги $K_{U(n)}$, % та K_U , % при застосуванні різних схем ФКП (варіанти схем згідно з рис. 2.4) з тяговим навантаженням 150 А (а); 300 А(б); 450 А(в)

Отримана інформація дає змогу відкоригувати спочатку прийняті параметри ФКП задля досягнення нормованих значень гармонік напруги.

Аналізуючи вищевикладене насамперед слід звернути увагу на високу ефективність односекційної ФКП: сумарний коефіцієнт гармонійних складових знижується приблизно у 2 рази (варіант 2 в табл. 2.1). Включення двосекційної ФКП (варіант 3) з налаштуванням на 3-ту та 5-ту гармоніки знижує сумарний коефіцієнт гармонійних складових ще на 20...40%. Таким чином, для зниження несинусоїдності прийнятними варіантами є як одно-, так і двосекційні ФКП. Важливо додати, пропоновані схеми ФКП ефективніше по фільтрації гармонік, ніж дворезонансні ФКП, що застосовуються в даний час [19].

При підключенні демпфуючих ланцюгів відбувається посилення 5-ї та 7-ї гармонійних складових, і тому в загальному випадку збільшується значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових порівняно з варіантом відсутності демпфуючих ланцюгів. Проте за необхідності включення демпфуючих ланцюгів, найбільш прийнятними варіантами є двосекційні ФКП з підключенням резисторів до секції з налаштуванням на п'яту гармоніку (варіанти 6 та 7). Так як струми 5-ї гармоніки значно менше струмів 3-ї гармоніки, то струм резистора, підключеного до фільтра 5-ї гармоніки, буде менше струму резистора, підключеного до фільтра 3-ї гармоніки і, отже, втрати потужності у ФКП з ДЛ у секції 250 Гц будуть найменшими, цим пояснюється перевага підключення резистора до фільтра 5-ї гармоніки.

З проведеного аналізу можна зробити наступні висновки.

1. ФКП може забезпечити виконання нормативних вимог щодо дотримання сумарного коефіцієнта гармонійних складових. Якщо за вимірами виявлено необхідність додаткового зниження коефіцієнта n -ї гармонійної складової $K_{U(n)}$, необхідно встановлювати додаткові фільтри.

2. На ділянках, де існує небезпека виникнення коливальних процесів у тяговій мережі (що можливо при консольному живленні тягової мережі та малої потужності (300...500 МВ·А) короткого замикання на вводах 110 кВ тягової підстанції), у секцію ФКП з налаштуванням на 2 Гц необхідно включати демпфуючі ланцюги (C_d - R_d).

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3. Практика роботи ФКП свідчить, що у переважній більшості випадків достатньо включати односекційні або двосекційні ФКП на тяговій підстанції або на пості секціонування без ДЛ.

Включення демпфуючих ланцюгів пов'язане із збільшенням потужності ФКП та втрат електроенергії. Необхідність включення ДЛ має бути ретельно проаналізовано та аргументовано у техніко-економічному обґрунтуванні.

4. Застосування нової в частині підключення демпфуючого ланцюга схеми дозволить значно знизити втрати потужності в резисторі фільтра.

5. Використання нової схеми ФКП для тягових мереж змінного струму залізниць дозволяє комплексно вирішувати проблеми підвищення якості електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонійних складових струму та напруги. Модульна структура дозволяє формувати ФКУ залежно від вимог щодо компенсації реактивної потужності, забезпечення електромагнітної сумісності ЕРС із СТЕ, системами зв'язку, автоматики та телемеханіки на тяговій підстанції. Наприклад, у випадках, коли сумарний коефіцієнт гармонік напруги в тяговій мережі не перевищує нормативних значень, демпфуючий фільтр можна виключити. Модульна структура дозволяє змінювати склад ФКП у міру розвитку тягової підстанції та найбільш економічно коригувати режими в конкретних точках системи тягового електропостачання.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ДІЛЯНЦІ БУЧА-ТЕТЕРІВ

3.1 Аналіз існуючої фільтрокомпенсуючої установки на ділянці Буча-Тетерів

На даний час, на досліджувальній ділянці Буча-Тетерів використовується найпростіший варіант ФКУ, який представляє собою батареї конденсаторів із послідовно увімкненим реактором. Схема найпростішої одноланкової ФКУ показана на рис. 3.1. Індуктивність реактора вибрана такою, щоб на частотах вищих гармонік опір ФКУ мала індуктивний характер.

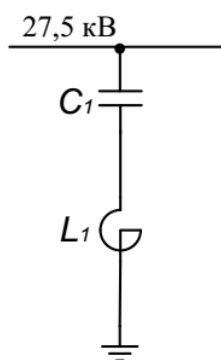


Рисунок 3.1 – Схема найпростішої одноланкової ФКУ, що використовується на ділянці Буча-Тетерів

Одноланкові ФКУ прості в експлуатації та обслуговуванні. Вони дозволяють покращити значення коефіцієнта потужності у системах тягового електропостачання та за рахунок цього підвищити напругу на струмоприймачі.

На рис. 3.2 показано частотну характеристику даної найпростішої ФКУ. На рис. 3.3 показані частотні характеристики вхідного опору тягової мережі щодо струмоприймача електрорухомого складу, а на рис.3.4 характеристики коефіцієнта передачі струму в тягову мережу при включенні найпростішої ФКУ. На рис. 3.5 представлена крива напруги на струмоприймачі ЕРС.

З рис. 3.3, 3.4, 3.5 випливає, що включення найпростішої ФКУ на рис. 3.1 не дозволяє послабити вищі гармоніки струму та напруги ($n \geq 5$) та демпфувати резонансні режими в тяговій мережі на частотах, що перевищують 800 Гц.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

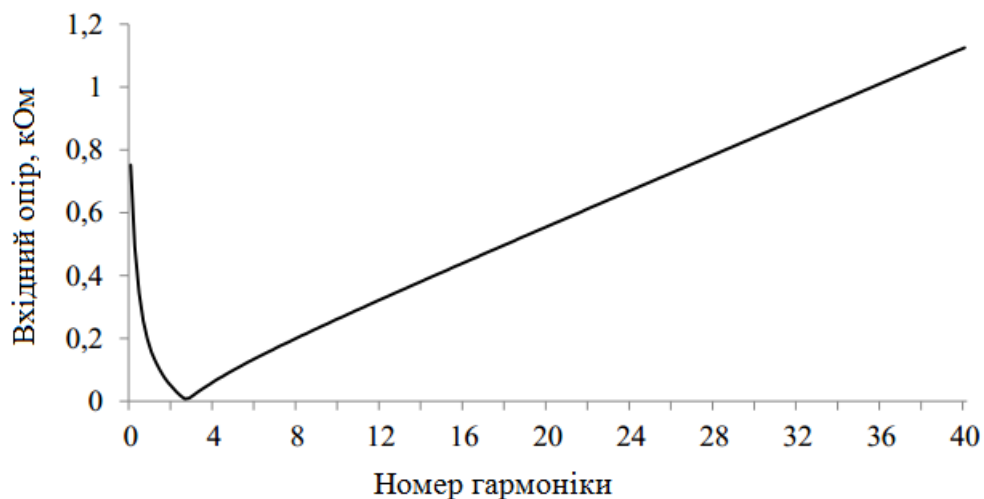


Рисунок 3.2 – Частотна характеристика найпростішого ФКУ

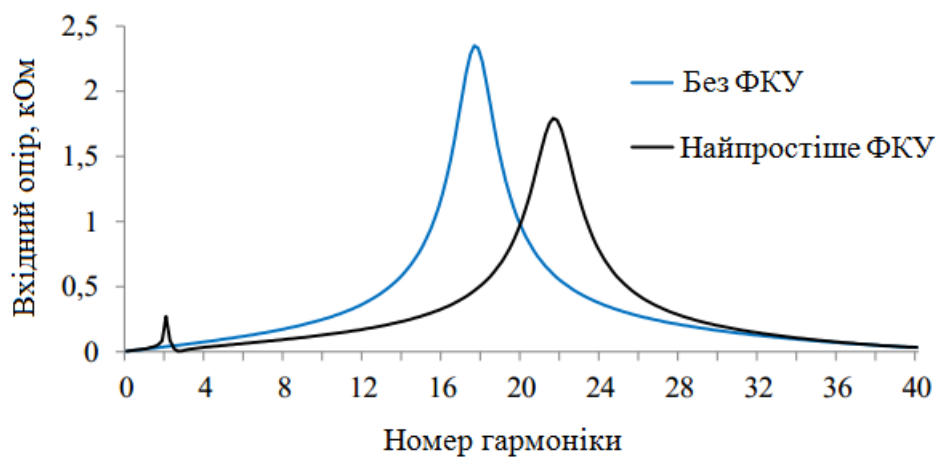


Рисунок 3.3 – Частотна характеристика вхідного опору тягової мережі струмоприймача ЕРС

Відповідно до вимог нормативних документів необхідно послаблення та інших гармонік струму та напруги непарного порядку ($n = 3, 5, 7, \dots$). Для цього необхідні складніші схеми ФКУ, які здійснюють одночасне придушення кількох гармонік.

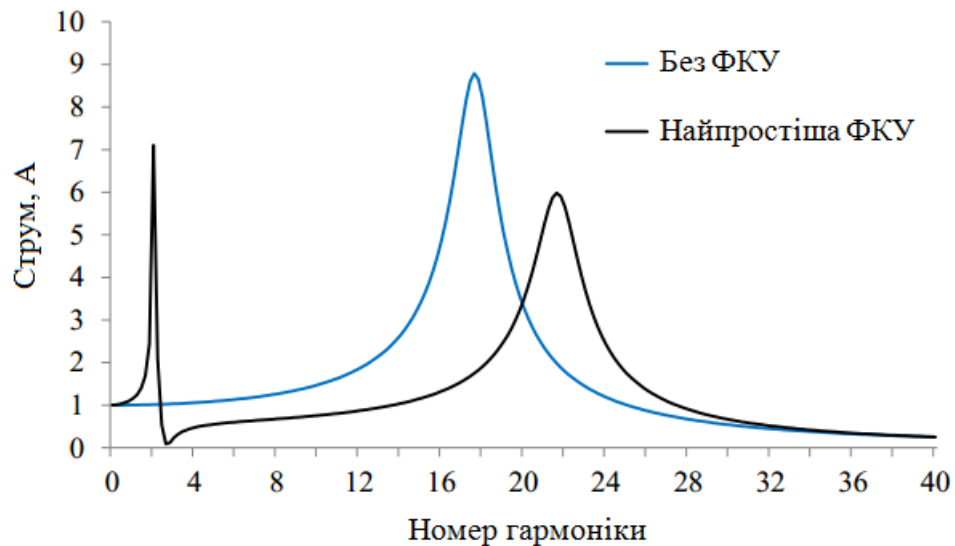


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт передачі струму в тягову мережу при включенні найпростішої ФКУ

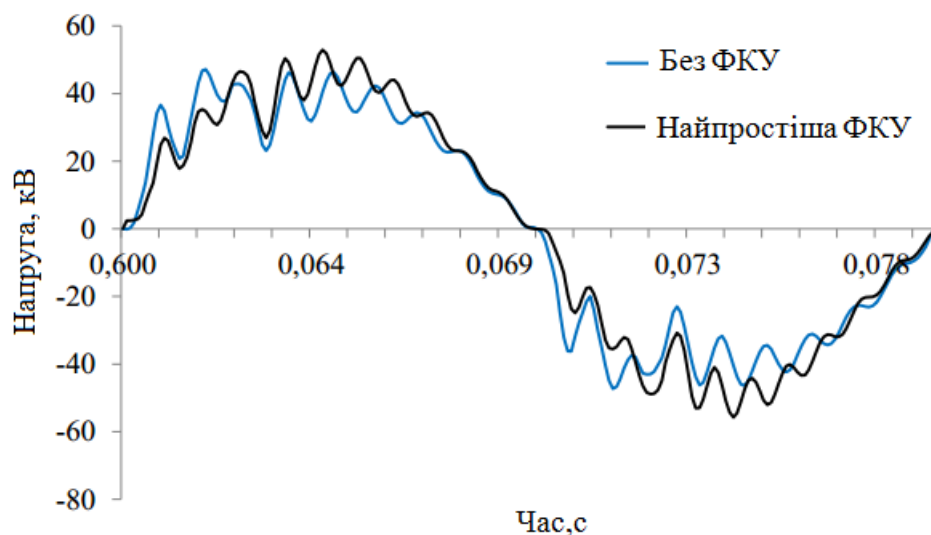


Рисунок 3.5 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при включенні найпростішої ФКУ

3.2 Розрахунок нової фільтрокомпенсуючої установки

Як альтернативу існуючої фільтрокомпенсуючої установки необхідно розрахувати пасивну ФКУ, призначену для встановлення в системі тягового електропостачання 27,5 кВ, яка має здійснювати придушення третьої та п'ятої гармоніки струму та виконувати демпфування характеристик системи тягового електропостачання на частотах, що перевищують 300 Гц. Потужність ФКУ становить 10 МВА.

Для розрахунку демпфуючого фільтра скористаємося методами, розглянутими у [20].

Значення елементів нормованого фільтра-прототипу верхніх частот Баттерворту 3-го порядку візьмемо з [20] (частота зрізу $\omega_0=1$ рад/с, опір навантажувального резистора $R=1$ Ом).

$$C_1 = 1 \text{ Ф}, L_2 = 0,75 \text{ Гн}, C_3 = 0,667 \text{ Ф}.$$

Для частоти зрізу, що дорівнює 300 Гц (1884 рад/с) значення елементів фільтра дорівнюють: $C_1 = 0,00053 \text{ Ф}, L_2 = 0,0004 \text{ Гн}, C_3 = 0,00035 \text{ Ф}.$

Прийmemo значення опору резистора навантаження рівним 150 Ом. Значення елементів, денормовані за опором 150 Ом, дорівнюють:

$$C_1 = 0,00053/150 = 3,53 \text{ мкФ};$$

$$L_2 = 0,0004 \cdot 150 = 60 \text{ мГн};$$

$$C_3 = 0,00035/150 = 2,33 \text{ мкФ}.$$

Схема демпфованого фільтра 3-го порядку показано на рис. 3.6.

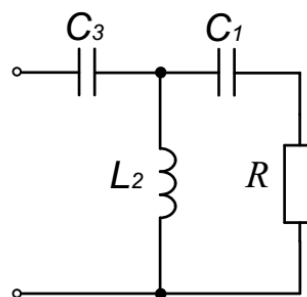


Рисунок 3.6 – Схема демпфованого фільтра 3-го порядку

Реактивна потужність широкосмугового демпфуючого фільтра третього порядку $Q_{ДФ}$ дорівнює:

$$Q_{ДФ} = U^2 \cdot \omega \cdot C_3, \quad (3.1)$$

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

де U – напруга живлячої мережі, В.

Підставляючи вихідні дані у формулу (3.1) отримаємо:

$$Q_{ДФ} = (27,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6} = 3,32 \text{ Мвар.}$$

З цього випливає, що реактивна потужність вузькосмугової ланки має становити 6,64 Мвар.

Для придушення третьої та п'ятої гармоніки струму використовуємо вузькосмуговий LC-фільтр, налаштований для придушення третьої та п'ятої гармоніки.

Значення його елементів представлені в табл.3.1.

Схему нового пасивного ФКУ представлено на рис. 3.7.

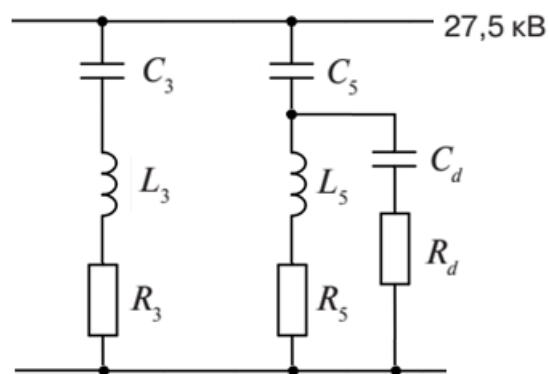


Рисунок 3.7 – Схема нового пасивного ФКУ

Значення елементів пасивного ФКУ представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення елементів нового ФКУ

L_3 , мГн	C_3 , мкФ	R_3 , Ом	L_5 , мГн	C_5 , мкФ	R_5 , Ом	C_d , мкФ	R_d , Ом
120	9,38	40	60	2,33	60	3,53	150

Частотна характеристика опору розрахованого ФКУ визначена на основі визначених елементів та показана на рис. 3.8.

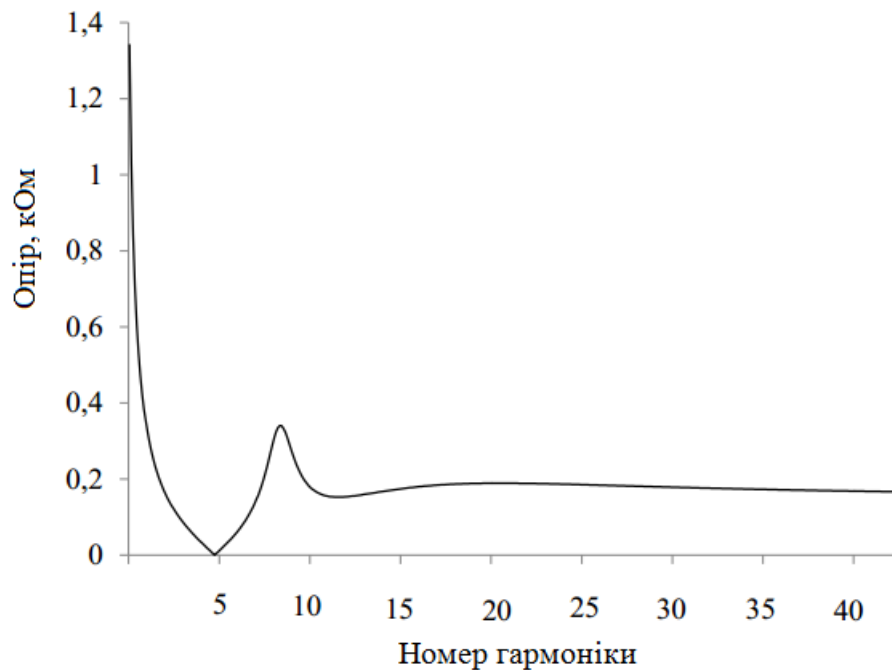


Рисунок 3.8 – Частотна характеристика опору ФКУ

Частотна характеристика системи тягового електропостачання з ФКУ встановленим на пості секціонування, представлена на рис. 3.9.

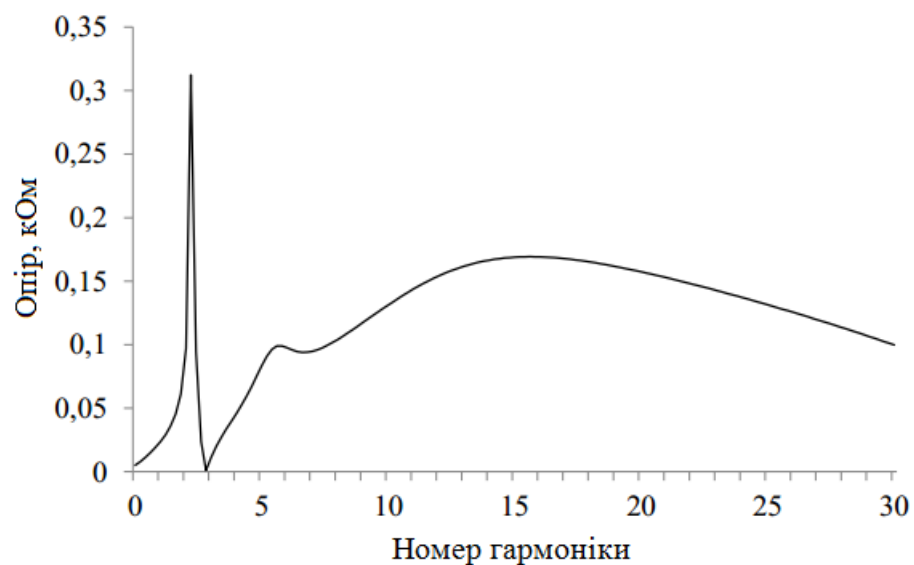


Рисунок 3.9 – Частотна характеристика системи тягового електропостачання із встановленим ФКУ

Криві напруги на струмоприймачі ЕПС представлені на рис. 2.38. Крива 1 – при встановленні вузькосмугового LC-фільтра, налаштованого для придушення третьої гармоніки. Крива 2 – при встановленні нового ФКУ на рис. 3.7.

Розрахунки показують, що після встановлення широкосмугового демпфуючого фільтра третього порядку сумарний коефіцієнт гармонік напруги знизився з 14% до 8%.

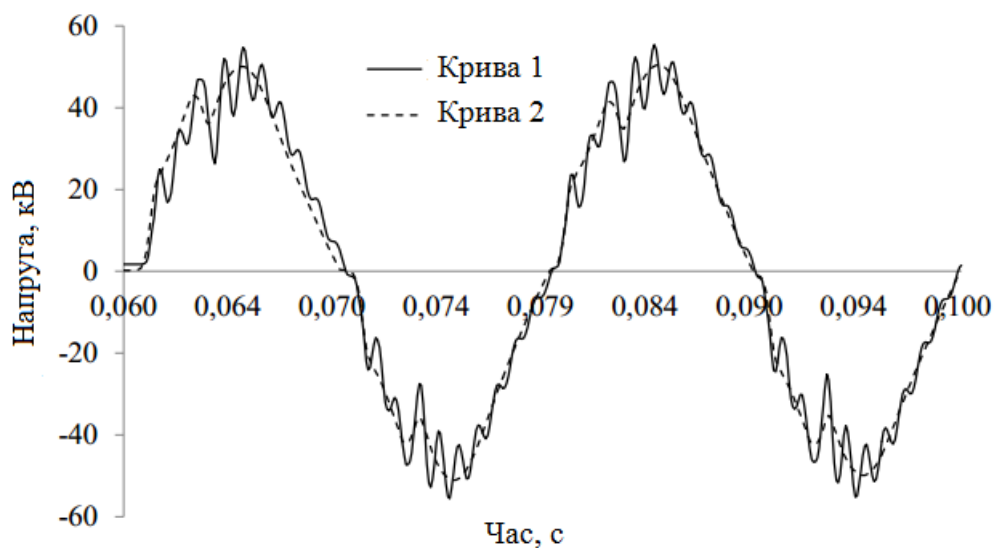


Рисунок 3.10 – Криві напруги на струмоприймачі ЕРС

Розглянуту схему ФКУ можна розглядати як варіант модернізації найпростішої одноланкової ФКУ (рис. 3.1), що забезпечує збільшення пропускної спроможності ділянки тягової мережі та зменшення несинусоїдності напруги мережі. Широкополосний фільтр може включатися в мережу при зменшенні напруги нижче за допустиму величину і відключатися при зниженні навантаження в системі тягового електропостачання.

При підключенні до мережі даних силових фільтрів частково або повністю вирішується завдання компенсації реактивної потужності, та підвищення якості електроенергії.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі на основі виконаного аналізу проблеми несинусоїдальних режимів в системі електропостачання і впливу вищих гармонік на елементи системи електропостачання визначено основні проблеми та способи їх усунення за допомогою використання сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Розглянуті схемні варіанти, а також перелік завдань, які розв'язують фільтрокомпенсуючі пристрої, свідчать про необхідність модульної побудови ФКП. Залежно від конкретних завдань для тієї чи іншої тягової підстанції або поста секціонування формується набір модулів ФКП.

Встановлено, що модульна структура дозволяє змінювати склад ФКП у міру розвитку тягової підстанції та найбільш економічно коригувати режими в конкретних точках системи тягового електропостачання.

За допомогою сучасних математичних програм проведено аналіз показників несинусоїдності напруги в тягових мережах при застосуванні ФКП різних конфігурацій та визначено найбільш перспективні та практичні схемні рішення.

Проведений аналіз результатів досліджень показав, що найкращі показники зниження фільтрованих гармонік напруги досягаються при використанні схем при включенні демпфуючих ланцюгів в секцію 3-ї або 5-ї гармоніки. Найбільш прийнятними варіантами є двосекційні ФКП з підключенням резисторів до секції з налаштуванням на п'яту гармоніку. Так як струми 5-ї гармоніки значно менше струмів 3-ї гармоніки, то струм резистора, підключеного до фільтра 5-ї гармоніки, буде менше струму резистора, підключеного до фільтра 3-ї гармоніки і, отже, втрати потужності у ФКУ з ДЛ у секції 250 Гц будуть найменшими, чим пояснюється перевага підключення резистора до фільтра 5-ї гармоніки.

Визначено основні параметри фільтрокомпенсуючих пристроїв на ділянці Буча-Тетерів та запропоновано нову схему ФКУ, яку можна розглядати як варіант модернізації найпростішої одноланкової ФКУ. Модернізована фільтрокомпен-

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

суюча установка має кращі частотні характеристики, веде до зменшення несунусоїдності напруги мережі та забезпечує збільшення пропускної спроможності ділянки тягової мережі. При підключенні до мережі даних силових фільтрів частково або повністю вирішується завдання компенсації реактивної потужності, та підвищення якості електроенергії. Розрахунки показують, що після встановлення даного широкосмугового демпфуючого фільтра сумарний коефіцієнт гармонік напруги знизиться з 14% до 8%.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коверникова Л.И. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
2. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
3. Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 152 с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
5. Шаров Ю. В. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р.Г. Шамонов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
6. Крюков А. В. Управление режимами систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 124с.
7. Макашева С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системах тягового электроснабжения переменного тока / С. И. Макашева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 104 с.
8. Тихменев Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – Москва: Транспорт, 1988. – 311 с.
9. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов – 11-е изд., – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.
10. Бурман А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие / А.П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

11. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

12. Герман Л. А. Принципы выбора мощности и размещения установок емкостной компенсации для повышения напряжения в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, Б. М. Бородулин – Вестник ВНИИЖТ, 2012, № 3. С. 29-35.

13. Герман Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. Пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков – М: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.

14. Герман Л. А. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. П. Гончаренко, А. В. Мизинцев. – Вестник ВНИИЖТ, 2013, № 1. С. 56-61.

15. Довгун В. П. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков, И. Ф. Николаев, А. Ф. Синяговский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2016, № 3 (545), с. 55-60.

16. Герман Л. А. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. В. Ермоленко, В. П. Гончаренко, В. А. Кващук, А. А. Максимова. – Вестник ВНИИЖТ, 2014, № 5. С. 47-53.

17. Коверникова Л. И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети высокого напряжения с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров / Л. И. Коверникова – Электричество, 2010. № 9, С. 50-55.

18. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть - электровоз». Электричество, 2002, № 2, с. 29-35.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

19. Герман Л. А. Фильтро-компенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, А. А. Максимова – Вестник ВНИИЖТ, 2016, Т. 75, № 1, с. 26-34.

20. Боярская Н. П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49