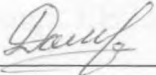




Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: «Підвищення електромагнітної сумісності нетягових споживачів та системи тягового електропостачання»
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав студент групи: EE2326

		/ Андрій ДОМАШЕНКО /
Керівник		/ доцент Денис ЗЕМСЬКИЙ /
Нормоконтролер:		/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент 

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

_____ (шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСЕ

 / Дмитро БОСИЙ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 01.04.24

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки

(ступінь вищої освіти,

студенту Домашенку Андрію Степановичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Підвищення електромагнітної сумісності нетягових споживачів та системи тягового електропостачання

Керівник роботи: Земський Денис Романович, доктор філософії, без звання
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "01" квітня 2024 р. № 246ст

2. Строк подання студентом 12.01.2025 р.
роботи:

3. Вихідні дані до роботи: відкриті технічні, наукові та нормативні джерела, навчальна література.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Основні проблеми при забезпеченні електромагнітної сумісності в системі тягового електропостачання

4.2 Аналіз існуючих методів забезпечення електромагнітної сумісності

4. Оптимізація параметрів багатofункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв для покращення електромагнітної сумісності в системі тягового електропостачання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

5.1 Аналіз проблем забезпечення електромагнітної сумісності нетягових

споживачів та системи тягового електропостачання

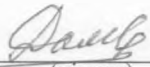
5.2 Характеристики існуючих пристроїв забезпечення електромагнітної сумісності в системі тягового електропостачання

5.3 Аналіз результатів оптимізації параметрів багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Основні проблеми при забезпеченні електромагнітної сумісності в системі тягового електропостачання	10.11.2024	30 %
2	Аналіз існуючих методів забезпечення електромагнітної сумісності	15.12.2024	60 %
3	Оптимізація параметрів багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв для покращення електромагнітної сумісності в системі тягового електропостачання	29.12.2024	95 %
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	12.01.2025	100 %
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	20.01.2025	

Студент


(підпис)

Андрій ДОМАШЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

Денис ЗЕМСЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Другого (магістерського) рівня вищої освіти Домашенка А.С. на тему:
«Підвищення електромагнітної сумісності нетягових споживачів та системи
тягового електропостачання»

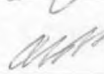
Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	69 стор.
Графічна частина (за наявності)	1	0 арк.
Демонстраційний матеріал	1	17 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	1	

Керівник:



/ Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер:



/ Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:



/ Дмитро БОСИЙ /

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 69 сторінок, складається із 3 розділів та містить 32 ілюстрації, 8 таблиць, 25 використаних джерела.

Мета роботи – визначення засобів та методів підвищення електромагнітної сумісності нетягових споживачів та системи тягового електропостачання.

В роботі проведено дослідження якості електроенергії в електроенергетичних системах нетягових споживачів та визначено джерела вищих гармонік у системі тягового електропостачання. Проаналізовано можливості зменшення впливу спотворення струмів та напруг на якість електроенергії в мережах нетягових споживачів та підвищення електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання.

Проведено аналіз сучасних фільтрокомпенсуючих пристроїв та визначено ступінь впливу різних конфігурацій даних установок на зменшення рівня гармонік струму та напруги в мережі. Проаналізовано частотні та часові характеристики існуючих фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Проаналізовано існуючу фільтрокомпенсуючу установку на ділянці змінного струму та запропоновано новий варіант сучасного фільтрокомпенсуючого пристрою з покращеними техніко-економічними характеристиками, що забезпечує покращення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з мережами нетягових споживачів.

Ключові слова: НЕТЯГОВІ СПОЖИВАЧІ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ГАРМОНІКИ СТРУМУ, НЕСИМЕТРІЯ, НЕСИНУСОЇДАЛЬНА НАПРУГА, ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	13
1.1 Якість електроенергії в електроенергетичних системах з тяговим навантаженням	13
1.2 Джерела вищих гармонік у системі тягового електропостачання	17
1.3 Якість електроенергії у мережах нетягових споживачів залізниць	21
1.4 Аналіз можливості зменшення впливу спотворення струмів та напруг на якість електроенергії в мережах нетягових споживачів	25
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ	33
2.1 Пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої для систем з тяговим навантаженням	33
2.2 Активні фільтрокомпенсуючі пристрої	39
2.3 Статичні тиристорні компенсатори для систем з тяговим навантаженням.....	42
2.4 Багатофункціональні фільтрокомпенсуючі пристрої	47
3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	49
3.1 Розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою для системи з тяговим навантаженням змінного струму	49

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підвищення електромагнітної сумісності нетягових споживачів та системи тягового електропостачання	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник		Домашенко А.С.					7	69
Керівник		Земський Д.Р.				УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕЕ2326		
Н. контр.		Потапчук І.Ю.						
Зав.каф		Босий Д.О.						

3.2 Аналіз частотних та часових характеристик фільтрокомпенсуючих пристроїв	59
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Актуальність роботи. Системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць представляють собою складні електротехнічні комплекси, які суттєво впливають на мережі зовнішнього електропостачання, системи зв'язку, автоматики та інші нетягові споживачі. Особливості СТЕ - невисокий коефіцієнт потужності та значні спотворення форми струмів та напруг. Завдання забезпечення якості електроенергії та електромагнітної сумісності на сьогоднішній день є досить актуальним, особливо в умовах зростання швидкостей руху, збільшення вантажопотоку та вимог, що посилюються, з боку енергопостачальних організацій.

Системи тягового електропостачання змінного струму мають низку особливостей, які визначають вимоги до функцій та характеристик фільтрокомпенсуючих пристроїв, що встановлюються у тягових мережах для підвищення якості електроенергії та зниження несиметрії струмів та напруг.

Перша особливість полягає в тому, що електрорухомий склад змінного струму є однофазним нелінійним навантаженням. Близько 90% локомотивів, що експлуатуються на вітчизняних залізницях, оснащені двонапівперіодними випрямлювальними установками та колекторними тяговими двигунами. У спектрі струму, споживаного електрорухомим складом (ЕРС), переважають низькочастотні непарні гармоніки (3-я, 5-а та 7-ма). Несинусоїдальні струми викликають спотворення напруг як у тяговій мережі, так і у зовнішніх мережах 35, 110 і 220 кВ які живлять тягові підстанції, що негативно впливає на споживачів які від них живляться.

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

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

споживачів.

Третя особливість – нестационарний характер тягових навантажень, що викликається зміною режиму роботи електрорухомого складу та його переміщенням. Змінні навантаження викликають значні коливання активної та реактивної потужностей. Тому, для досягнення найбільш економічного режиму роботи, системи тягового електропостачання потребують динамічну компенсацію реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження.

Таким чином, для забезпечення електромагнітної сумісності тягового електропостачання із нетяговими споживачами необхідні компенсуючі пристрої, основні функції яких полягають у наступному: регулювання реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження; придушення потужних низькочастотних гармонік; демпфування резонансних явищ, визваних хвильовими процесами в тяговій мережі, та ослаблення високочастотних гармонік струму для зниження рівня кондуктивних та електромагнітних перешкод.

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

Мета і завдання роботи. Визначення засобів та методів підвищення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та нетягових споживачів.

Об'єкт дослідження – електроенергетичні системи із тяговим навантаженням змінного струму.

Предмет дослідження – методи розрахунку багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв для покращення енергоефективності та підвищення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та нетягових споживачів.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань в роботі виконані узагальнення і аналіз матеріалів науково - технічної літератури, теоретичних

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досліджень провідних фахівців у галузі основних положень теоретичної електротехніки, теорії ланцюгів з розподіленими параметрами, сучасних методів аналізу та синтезу електричних кіл.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист:

1. Досліджено особливості електромагнітних процесів в електроенергетичних системах з тяговим навантаженням змінного струму.
2. Запропоновано та обґрунтовано модульну структуру нових багатофункціональних ФКП, що забезпечують незалежну корекцію частотної характеристики опору системи тягового електропостачання в діапазонах низькочастотних та високочастотних гармонік. ФКП запропонованої структури здійснюють компенсацію реактивної потужності, придушення вищих гармонік струму та напруги, а також демпфування резонансних режимів у діапазоні високочастотних гармонік, що дає можливість суттєво знизити електромагнітний вплив тягового навантаження на нетягові споживачі.

Практичне значення отриманих результатів: Установка нових багатофункціональних ФКП в системах з тяговим навантаженням змінного струму підвищить енергоефективність систем тягового електропостачання за рахунок зниження втрат електроенергії, покращить якість електроенергії в мережах нетягових споживачів, що отримують живлення від тягових підстанцій та знизить електромагнітний вплив електрорухомого складу, на пристрої нетягових споживачів.

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 Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛІЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024», 27 листопада 2024 року.

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Публікації.

Домашенко А., Земський Д. Синтез фільтрокомпенсуючих пристроїв для підвищення електромагнітної сумісності систем тягового електропостачання та нетягових споживачів. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024» : ЗБ. ТЕЗ, м. Дніпро, 27 листоп. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 84.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Якість електроенергії в електроенергетичних системах з тяговим навантаженням

На сьогоднішній день значна частина електроенергії використовується у перетвореному вигляді. На електрифікованих залізницях використовують системи тягового електропостачання (СТЕ) однофазного змінного струму напругою 25 кВ. На електровозах залізниці в якості силових установок використовують випрямно-інверторні перетворювачі, внаслідок чого в тяговій мережі та лініях передачі виникають вищі гармоніки струму та напруги.

В залежності від розташування електровозів на міжпідстанційній зоні та відстані від тягової підстанції, спотворення кривих струму та напруги в тяговій мережі при роботі у різних режимах відбувається по-різному.

Наявність нелінійних, несиметричних та різко змінних тягових навантажень визначає складний багатофакторний характер електромагнітних процесів. Так як система електропостачання залізниць змінного струму являє собою сукупність одно- та двофазних навантажень системи, то в результаті тягове навантаження буде несиметричним щодо тягового трансформатора та зовнішньої системи електропостачання. Ці навантаження є джерелом несиметрії у трифазній мережі, зокрема, несиметрії напруги в тягових споживачах системи «два провідники – рейка», а також суміжних нетранспортних споживачів, приєднаних до третинних обмоток тягових трансформаторів. В мережі живлення нетягових споживачів також «проникає» несиметрія. Слід також зазначити, що при цьому рівень напруги по фазах мережі, як правило, виявляється різним [1].

Вищі гармоніки струму, які генеруються в тягову мережу випрямними агрегатами електровозів, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, можуть проникати у зовнішні мережі та райони електропостачання нетягових споживачів. Перебіг таких струмів вищих гармонік призводять до виникнення значної кількості негативних процесів, таких як:

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- негативний вплив, на пристрої дротяного зв'язку в результаті електромагнітної індукції;
- збільшення втрат активної та повної потужності в пристроях електропостачання;
- виникнення додаткових втрат 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, які підключені до мережі нетягових споживачів, що у ряді випадків може приводити до необхідності збільшення їх встановленої потужності;
- додаткове нагрівання ізоляції обмоток трансформаторів, що призводить до зменшення строку їхньої служби;
- прискорене теплове старіння ізоляції обмоток статора асинхронних електродвигунів які підключені до мережі нетягових споживачів;
- виникнення додаткової похибки при вимірюванні електроенергії, що може призвести до результуючої похибки, яка може перевищувати допустимі значення;
- обрив нейтрального проводу внаслідок відгоряння контакту при значному рівні гармонік із номерами, кратними трьом, що може призвести до виходу з ладу окремих електроприймачів через появу підвищених напруг на їх затискачах;
- резонансні ефекти на частотах найвищих гармонік, що створюють значні проблеми для сучасного електрообладнання;
- загальне зниження надійності системи електропостачання нетягових споживачів.

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

Для визначення величини впливу вищеперерахованих негативних явищ, введено поняття якості електроенергії, що визначається як сукупність

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням.

Несинусоїдні струми, як і будь-яку періодичну несинусоїдну величину, можна розкласти у вигляді ряду Фур'є, тобто суми простих гармонічних складових з різними частотами коливань. Дані струми, проходячи через опори елементів системи електропостачання викликають падіння напруги, що при накладенні на основну синусоїду напруги приводить до суттєвого її спотворення. Особливо сильні спотворення напруги спостерігаються на струмоприймача електровозів які знаходяться на віддалених від тягової підстанції відстанях. Для прикладу на рис. 1.1 показана крива напруги на струмоприймачі електровоза, що знаходиться в кінці ділянки змінного струму при консольній схемі живлення з довжиною 30 км. Таке спотворення форми напруги викликає погіршення якості електроенергії та з'являється проблема електромагнітної сумісності електроприймачів з живильною мережею.

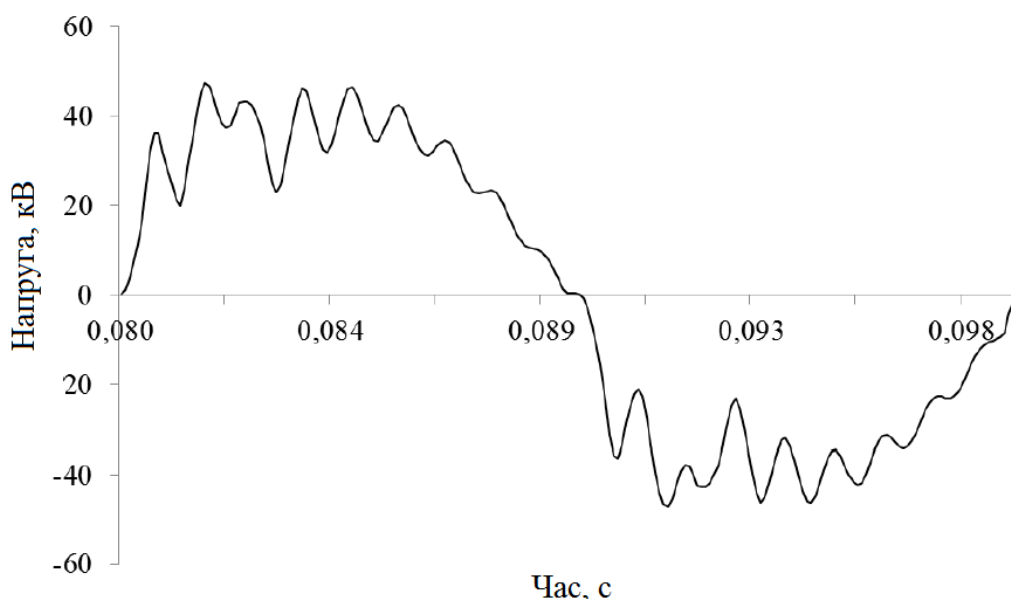


Рисунок 1.1– Крива напруги на струмоприймачі ЕРС

Несинусоїдність напруги характеризується такими показниками як:

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

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги визначається як відношення діючого значення гармонійного вмісту несинусоїдності 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 гармонік.

При значенні величини гармоніки менше 0,1%, в розрахунку K_u такі гармоніки допускається не враховувати.

Для мереж з різним значенням напруги існують нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги. Дані величини приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги K_u , %

Нормально допустимі значення при $U_{ном}$, кВ				Гранично допустимі значення при $U_{ном}$, 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, в залежності від номінальної напруги мережі $U_{ном}$, приведені в таблиці 1.2.

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

Непарні гармоніки, не кратні 3	Непарні гармоніки, кратні 3	Парні гармоніки при
-----------------------------------	--------------------------------	------------------------

при $U_{ном}, кВ$					при $U_{ном}, кВ$					$U_{ном}, кВ$				
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										

1.2 Джерела вищих гармонік у системі тягового електропостачання

Система тягового електропостачання змінного струму має ряд особливостей, які визначають вимоги до функцій та характеристик пристроїв, що встановлюються для підвищення якості електроенергії.

Перша особливість полягає в тому, що електрорухомий склад (ЕРС) змінного струму є не тільки значним споживачем реактивної потужності та несинусоїдного струму, але і суттєвим однофазним несиметричним нелінійним навантаженням. Близько 80% локомотивів, що експлуатуються на наших залізницях, оснащені дво-напівперіодними випрямлювальними установками та колекторними тяговими двигунами. У спектрі струму, що споживається ЕРС, здебільшого присутні непарні низькочастотні гармоніки (3-я, 5-а та 7-ма). Несинусоїдальні струми викликають спотворення напруг як у тяговій мережі, так і у зовнішніх мережах, що живлять тягові підстанції.

У кривій напруги в процесі комутації з'являються комутаційні спотворення. Величина, кількість та форма таких спотворень залежить від багатьох факторів, таких як: схема випрямлення, потужність перетворювачів, кількість фаз випрямлення, параметри мережі живлення та кута управління перетворювачів.

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ					Арк.
										17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Спотворені криві напруги та струму мережі живлення в процесі роботи перетворювача мають періодичний характер. Даний факт дозволяє проводити аналіз їх гармонійного спектру та визначати наявність гармонік кратних основній частоті. Значення порядку вищих гармонік можна визначити за допомогою виразу:

$$n = mk \pm 1,$$

де m - число фаз випрямлення;

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

Крім гармонійного складу фазних струмів випрямляючої установки, який визначається схемою випрямлення, також існують неканонічні вищі гармоніки або, так звані «анормальні», з порядками, що не відповідають числу пульсації випрямлення.

Основними причинами виникнення таких неканонічних гармонік є наступні:

- відхилення від номінального значення кутів керування вентилями перетворювача;
- живлення випрямляючої установки від мережі зі спотвореною формою кривої напруги;
- живлення випрямляючого перетворювача від мережі з несиметричною напругою.

В основному такі «анормальні» гармоніки пояснюються випадковими подіями та визначаються імовірнісними величинами. При цьому їх значення в порівнянні з канонічними незначні, тому зазвичай їх не враховують в подальших розрахунках.

Проведені дослідження [2] кривої струму первинної обмотки тягового трансформатора електрорухомого складу i_1 , який споживається з мережі, показали, що зазвичай вона має несинусоїдальну форму, в не залежності від типу вхідного перетворювача і характеру тягового навантаження. Крива даного струму i_1 містить в собі основну гармоніку $i_{1(1)}$ з частотою мережі 50 Гц та деякий

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

склад вищих гармонійних складових. При розкладанні в ряд Фур'є даної кривої струму i_1 отримано, що в ній відсутня постійна та косинусні складові, а в синусної частині складової є тільки непарні гармонійні компоненти. З даних досліджень випливає, що в склад кривої струму i_1 крім першої гармоніки входить ряд непарних вищих гармонік, старша ($n = 3$) і наступні ($n = 5, 7, 9, \dots$), тобто $n = 2k + 1$.

Амплітуди вищих гармонійних складових обернено пропорційні їх порядковому номеру, та визначаються як:

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

де n – номер вищої гармоніки.

У відповідності з дослідженням [2] в табл. 1.3 наведено вміст вищих гармонійних складових струму мережі $i_{1(1)}$ (ефективне значення).

Таблиця 1.3 – Ефективні значення вищих гармонік 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
$I_{m(1)}/n$, %	-	34	-	21	-	14	-	11	-	9	-	8	-	7	-	6	-	5	-	5	-	4	-	4

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

Значення складових вищих гармонік в кривій первинного струму при збільшенні кута комутації γ , тобто при ідеальному згладжуванні струму I_d , знижується, а при збільшенні кута управління α зростають амплітуди вищих гармонійних складових.

Важлива особливість системи тягового електропостачання полягає в тому, що на частотах гармонік високого порядку необхідно враховувати розподіл параметрів протяжної контактної мережі. Хвильові процеси в тяговій мережі

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ																		Арк.
																							19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата																			

супроводжуються резонансними явищами, які інколи можуть спричинити перенапруги на струмоприймачах електрорухомого складу залізниці. Крім того, тягова мережа створює значний електромагнітний вплив на пристрої нетягових споживачів.

Іншою особливістю СТЕ є нестационарний характер тягових навантажень, що виникає при переміщенні ЕРС, або зміні режиму його роботи. Змінні навантаження викликають суттєві коливання реактивної та активної потужностей. Тому, для досягнення найбільш ефективного режиму роботи СТЕ необхідна динамічна компенсація реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження.

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

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

Відповідно до вимог нормативних документів встановлення поперечної ємнісної компенсації для СТЕ повинні виконуватися у вигляді фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП), які здійснюють компенсацію реактивної потужності та придушення вищих гармонік струму та напруги [2].

1.3 Якість електроенергії у мережах нетягових споживачів заліниць

Для електропостачання від електрифікованих заліниць нетягових споживачів, які розташовані на залізничних перегонах і станціях, що знаходяться в зонах між підстанціями (освітлення, пристрій автоблокування та ін.), відбувається підключення, як правило, до ліній так званого поздовжнього

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електропостачання з напругою 6, 10, 35 кВ. Якщо основне живлення пристроїв сигналізації, централізації та блокування, а також зв'язку здійснюється від окремих ліній електрозабезпечення автоблокування, то резервне – від ліній «два проводи – рейки» (ДПР) з номінальною напругою 25 кВ або поздовжнього електропостачання (ПЕ) напругою 6 та 10 кВ. Від зазначених ліній ПЕ та ДПР отримують живлення так само і сторонні споживачі у вигляді промислових підприємств та населення.

Через використання випрямлячів в сучасних системах електропостачання, відбувається значні спотворення форми напруги і споживаного струму, істотну частку якого складають компоненти з частотою вищих гармонік.

Поява вищих гармонік надає значний несприятливий вплив на роботу силового електрообладнання, пристроїв релейного захисту та автоматики, та викликає прискорене старіння ізоляції [3].

Вирішення проблеми ефективності використання електроенергії в мережах нетягових споживачів залізниць є досить актуальним питанням і має базуватися на результатах оцінки показників якості електроенергії безпосередньо в процесі її передачі та споживання в мережах, що розглядаються.

Для оцінки показників якості електроенергії у мережах нетягових споживачів існує достатня кількість сучасних засобів та приладів. Сучасні засоби вимірювальної техніки реалізують прогресивні алгоритми аналізу та обробки експериментальних даних достатнього рівня складності, тому вони забезпечують високу для поставленої мети точність вимірів. При цьому контроль та фіксація якості електромагнітних процесів у ланцюгах змінного струму здійснюються в основному портативними аналізаторами, такими, наприклад, як EDL-175хг або PNA-296 виробництва фірми SATEC, побудованими на базі приладу для обліку електричної енергії РМ175 [4]. На рис. 1.2 наведено схему вимірювання показників якості електроенергії в лінії ДПР, на діючій електрифікованій ділянці змінного струму.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

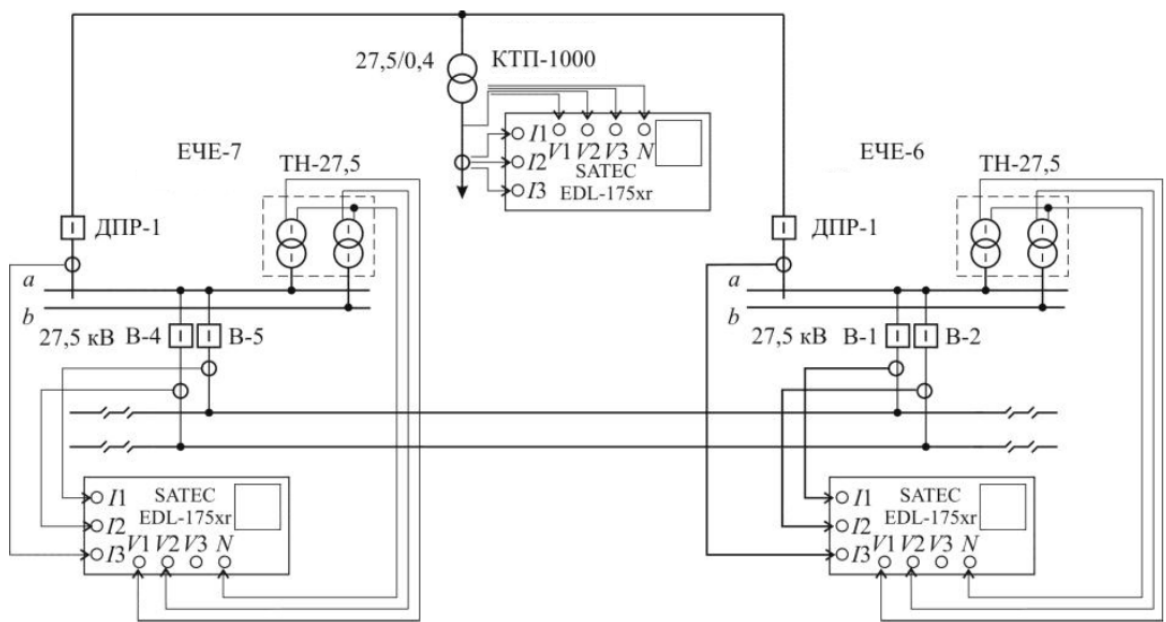
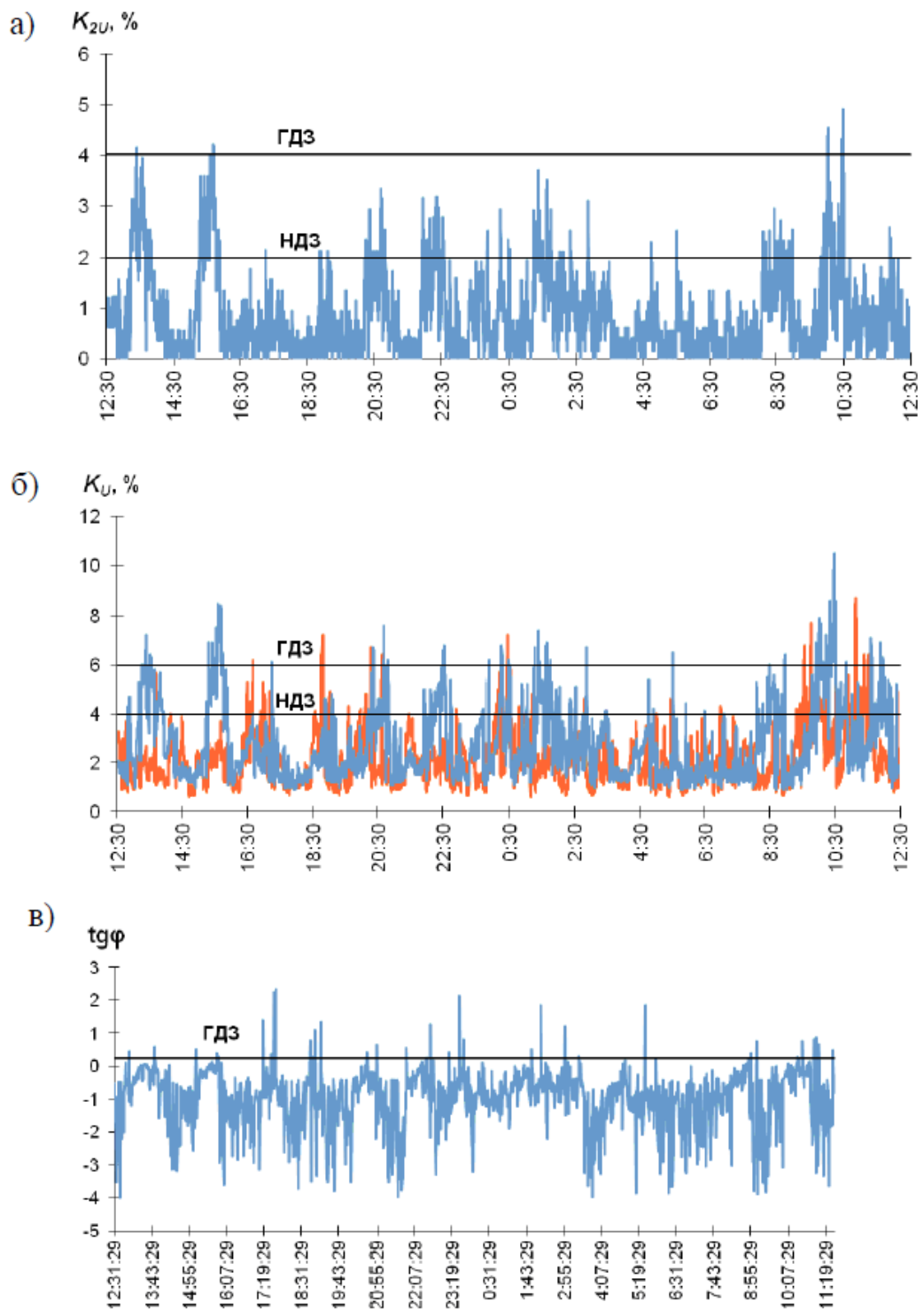


Рисунок 1.2 – Схема проведення вимірювань на промисловому об'єкті, що живиться від ДПР

Дана схема вимірювань дала можливість оцінити такі показники якості електричної енергії як:

- величину та відхилення напруги;
- коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги.

Додатково виконано оцінку значення коефіцієнта реактивної потужності та коефіцієнта спотворення струму. Як приклад на рис. 1.3 наведено фрагменти реєстрації зазначених показників у лінії живлення нетягових споживачів ДПР напругою 27,5 кВ, а результати їхньої статистичної обробки представлені в таблиці 1.4.



а) коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю; б) коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги; в) коефіцієнт реактивної потужності
 Рисунок 1.3 – Зміни показників якості електроенергії у лінії ДПР 27,5кВ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 1.4 – Статистичні показники якості електричної енергії в лінії ДПР 27,5 кВ

Показник	U, B			δU	$K_{2U},$ %	$K_U, \%$			tg φ	$K_i,$ %
	U_A	U_B	U_C			U_A	U_B	U_C		
Середній	27844,55	28179,63	28016,05	1,86	0,83	2,76	2,14	0,0	-0,97	
Min	25259,00	26393,00	26313,00	-4,50	0,03	0,9	0,6	0,0	-3,99	6,4
Max	28799,00	28974,00	28743,00	4,52	4,90	10,5	8,7	0,0	2,35	41,7

Аналіз отриманих результатів якості електроенергії в лінії ДПР дозволяє зробити висновок, що в цілому статистичні характеристики відхилення напруги, що встановилося, в мережі 27,5 кВ знаходяться в межах допустимих значень і за час спостереження змінювалися несуттєво.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій варіювався в межах 0...4,9%, що перевищує нормально допустиме значення, але знаходиться в межах гранично допустимих значень. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах зазначених підстанцій змінювався в межах 0...10,5%, що перевищує як нормально допустиме, так і гранично допустиме значення.

У той самий час, на приєднаннях 0,4 кВ величина коефіцієнта K_U перебувала у межах 1,4...10,3%, що перевищує нормально допустиме, але у межах гранично допустимого значення. При цьому відхилення напруги, що встановилося, змінювалося від мінус 2,66% до + 7,42%, що перевищує нормально допустимі значення. Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на приєднаннях 0,4 кВ змінювався в значних межах 0...3,43%, хоча перевищення нормально допустимого значення і відбувалися лише в деякі моменти часу.

Спостереження за змінами коефіцієнта реактивної потужності в досліджуваних лініях показав, що в лінії ДПР майже протягом всього часу має місце генерація реактивної потужності. Можливо припустити, що вона викликана великою ємністю лінії при незначному рівні навантаження.

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналізуючи лінії 0,4 кВ мало місце споживання лише реактивної потужності практично протягом всього часу спостереження.

Щодо значення $\text{tg}\phi$, то на всіх досліджуваних напругах воно перевищує нормований рівень 0,25.

На особливу увагу заслуговує аналіз коефіцієнта спотворення струму. Нормативні документи, діючі на території України, що регулюють питання забезпечення якості електроенергії, розглядають показники якості електроенергії, похідні від напруги [4]. У європейських країнах використовується стандарт IEC 519-1992 [5], який визначає максимальні значення струмів непарних гармонік у відсотковому відношенні до струму навантаження. Відповідно до цього стандарту максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму залежить від відношення струму короткого замикання мережі в точці загального приєднання до струму навантаження. В результаті для потужної мережі (прийmemo до уваги той факт, що потужність тягової підстанції значно перевищує потужність нетягового навантаження) максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму не повинна перевищувати 15%. Струми гармонік з порядковими номерами $n < 11$ повинні бути менше 12% від струму навантаження. Як показали результати аналізу, коефіцієнти спотворення струму в досліджуваних лініях значно перевищують наведені нормативи. При цьому інтервали змін спотворення струму мають великі значення в лінії ДПР і в споживачах 0,4 кВ, що отримують від неї живлення.

Таким чином, проведений аналіз типових спотворень та кількісна оцінка показників якості електроенергії в мережах нетягових споживачів дозволяє зробити висновки про те, що якість електричної енергії не відповідає встановленим нормам. В них присутні спотворення, зумовлені роботою напівпровідникових перетворювачів, насиченням магнітопроводів трансформаторів, тощо. Відповідно до вимог нормативних документів, по коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги, за окремими

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гармоніками спостерігається значне перевищення коефіцієнтів гармонійних складових напруги.

В результаті виконаних досліджень показників якості електроенергії в лініях живлення нетягових споживачів залізниць встановлено, що проблема забезпечення якості електричної енергії в таких випадках ще актуальніша у зв'язку з змінами характеру навантаження, що відбуваються. Особливої уваги потребує вирішення цього питання для нетягових споживачів, у яких характерна наявність значної кількості обладнання, на роботу якого суттєво впливає якість електричної енергії.

Результати проаналізованих досліджень показують те, що на кожному з рівнів напруги компенсація реактивної потужності на зазначених ділянках має свою специфіку, яку необхідно враховувати під час розробки заходів щодо покращення якості електричної енергії та забезпечення електромагнітної сумісності СТЕ та нетягових споживачів. Визначені вітчизняними нормативними документами показники якості електроенергії не відповідають встановленим нормам та мають великий розкид статистичних характеристик, а коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму, відповідно до міжнародного стандарту, також перевищує допустимі значення. Як наслідок, проблема підвищення якості електричної енергії в мережах нетягового електропостачання залізниць є складнішою, а її рішення має передбачати заходи, спрямовані не лише на підвищення енергоефективності, а й на забезпечення електромагнітної сумісності та надійності електропостачання.

1.4 Аналіз можливості зменшення впливу спотворення струмів та напруг на якість електроенергії в мережах нетягових споживачів

В системі тягового електропостачання від шин тягових підстанцій одержують живлення нетягові залізничні споживачі, що належать до першої категорії щодо забезпечення надійності електроживлення. Спотворення форми кривих напруг та струмів у тяговій мережі суттєво погіршує якість електроенергії в мережах таких споживачів. Погіршення якості електроенергії в мережах нетягових

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

споживачів може призвести до виникнення аварійних режимів та зриву графіка руху поїздів, виходу з ладу чутливого електронного обладнання та інших негативних наслідків.

Тягові мережі змінного струму впливають на пристрої провідного зв'язку. І на відміну від мереж загального призначення, де в основному розглядають якість електроенергії за напругою, у системі електричної тяги змінного струму, в електромагнітному полі якої знаходяться пристрої провідного зв'язку, існують вимоги до спектрального складу тягового струму. Для вибору заходів щодо зниження напруги, що заважає, в ланцюгах зв'язку встановлено розрахункове значення первинного струму умовного електровоза: який працює в режимі тяги - 150 А, для працюючого в режимі рекуперації – 90 А. Крім того, встановлено приблизний процентний вміст гармонійних складових струму електровоза при тязі та рекуперації на одноколіній і двоколіній ділянці.

Також важливо враховувати і те, що частотні характеристики тягової мережі можуть істотно впливати на форму кривої струму, спотворюючи її. Це у свою чергу призводить до спотворення форми струму у вторинній обмотці тягового трансформатора.

Для прикладу на рис.1.4 показаний спектр струму вторинної обмотки трансформатора власних потреб тягової підстанції (фаза А) отриманих в результаті досліджень [6]. З даного рисунку видно суттєве значення вищих непарних 3,5,7,11-ї гармонік та інших, та незначне значення парних гармонійних складових. Наявність даних гармонік приводить до значного погіршення синусоїдальності кривої струму і як наслідок і кривої напруги.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

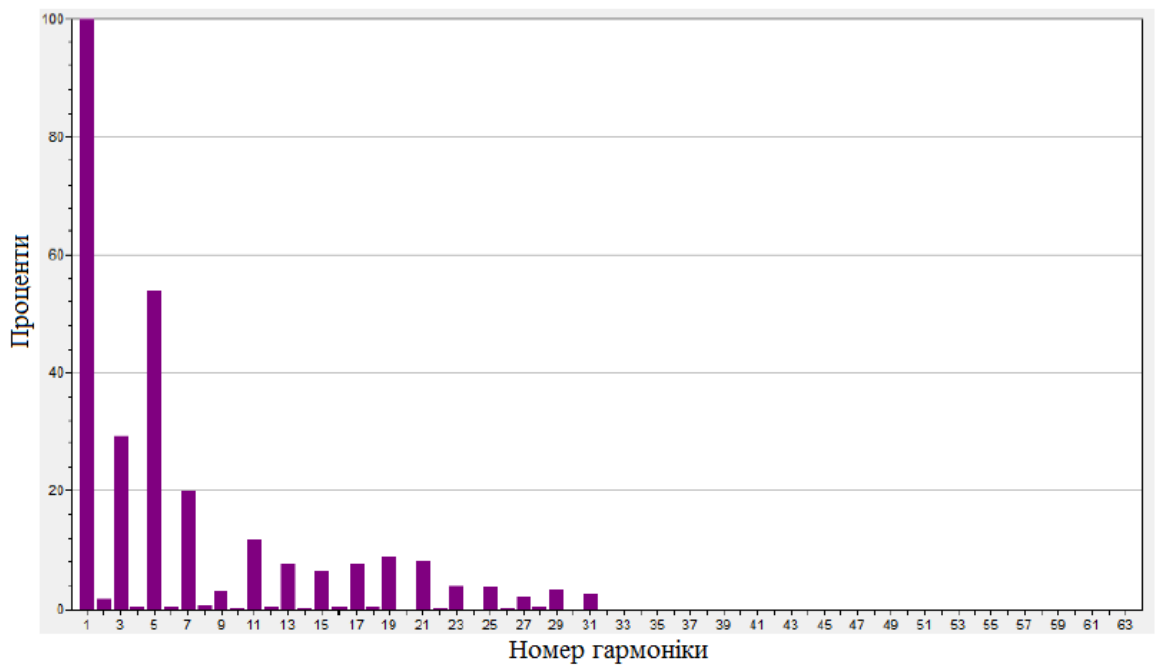


Рисунок 1.4 – Спектр струму вторинної обмотки трансформатора потреб тягової підстанції (фаза А)

Визначення характеру відхилення форми кривої струму або напруги від синусоїдальної можливо виконувати за допомогою наступних коефіцієнтів:

- коефіцієнта амплітуди:

$$K_A = \frac{|u|_{\max}}{U},$$

де $|u|_{\max}$ – максимальне миттєве значення напруги;

U - значення діючої напруги;

- коефіцієнта форми:

$$K_{\text{форм}} = \frac{U}{U_{\text{ср}}},$$

де $U_{\text{ср}}$ - середнє значення напруги;

- коефіцієнта спотворення:

$$K_{cn} = \frac{U_1}{U},$$

де U_1 – дійсне значення першої гармоніки;

- коефіцієнта гармонік

$$K_2 = \frac{U_s}{U_1},$$

$$\text{де } U_s = \sqrt{U^2 - U_0^2 - U_1^2},$$

U_0 – напруга постійної складової.

Для обмеження наслідків погіршення якості електричної енергії, спричинених несинусоїдністю струмів та напруг, необхідно проведення ряду організаційних та технічних заходів [7].

У системах тягового електропостачання змінного струму найбільший ефект дає використання спеціальних компенсуючих пристроїв – активних та пасивних фільтрів гармонік. Пасивний фільтр гармонік (ПФГ) є сукупністю коливальних контурів, налаштованих на частоти окремих визначених гармонік. При установці таких фільтрів поблизу нелінійного навантаження існує можливість замикання на землю струмів вищих гармонік через відповідний коливальний контур. На сьогоднішній день, завдяки своїй простоті та економічності, пасивні фільтри гармонік є основним видом фільтрокомпенсуючих пристроїв. Недолік пасивних фільтрів полягає у можливості виникнення резонансу струмів у паралельному коливальному контурі, який може бути утворений фільтром та індуктивністю живлячої мережі. Дане явище може призвести до посилення гармоніки, частота якої близька до частоти паралельного резонансу системи тягової мережі.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Новими та значно складнішими пристроями, ніж їх пасивні аналоги є активні фільтри гармонік. Багато питань теорії та практики застосування цих пристроїв у системах електропостачання з тяговими навантаженнями ще не вирішено. Суттєвим їх недоліком є висока вартість та необхідність обслуговування на досить високому кваліфікаційному рівні.

Система електропостачання, електрорухомий склад та фільтрокомпенсуючий пристрій утворюють складну резонансну систему.

На промисловій частоті контактну мережу змінного струму можна представити як ланцюг з зосередженими параметрами [8]. Однак на частотах, що перевищують 500 Гц, довжина хвилі гармоніки напруги або струму стає порівнянною з довжиною тягової мережі, тому при аналізі електромагнітних процесів на частотах гармонік необхідно враховувати розподілений характер системи тягового електропостачання.

Довжина хвилі низькочастотної гармоніки ($n=3,5,7$) значно перевищує протяжність ділянки тягової мережі, тому для таких гармонік тягову мережу можна розглядати як систему із зосередженими параметрами. Розподілений характер тягової мережі проявляється на частотах, що перевищують 750 Гц ($n>15$).

Тому, на сьогоднішній день, для забезпечення ефективної роботи електрорухомого складу у системах тягового електропостачання необхідні фільтрокомпенсуючі пристрої, що виконують наступні функції:

1. Для послаблення низькочастотних гармонік, по відношенню до яких тягова мережа представляє систему із зосередженими параметрами, необхідно застосовувати вузькосмугові резонансні фільтри, опір яких має мінімальне значення на частотах таких гармонік.

2. Основне завдання фільтрокомпенсуючих пристроїв у високочастотному діапазоні, для гармонік, частоти яких перевищують 500 Гц, і тягова мережа є системою з розподіленими параметрами, є демпфування резонансних явищ для запобігання посиленню вищих гармонік напруги та струму. Саме тому на рівні високочастотних гармонік опір ФКП має бути узгоджений із хвильовим опором

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактної мережі. Це дасть можливість обмежити резонансні перенапруги на струмоприймачі електрорухомого складу, виключити можливість додаткових переходів кривої напруги через нульову лінію, знизити електромагнітний вплив тягової мережі, на пристрої нетягового електропостачання.

3. Для отримання найбільш ефективної роботи тягової мережі та нормалізації режиму напруги в системі тягового електропостачання ФКП має включати пристрої, що забезпечують динамічну компенсацію реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження, яке має різкозмінний характер та викликає коливання активної та реактивної потужностей.

Для одночасного виконання вище перерахованих функцій можливо використовувати структуру, яка утворена паралельним з'єднанням модулів, що реалізують заданий опір у певному діапазоні частот. Це дає можливість забезпечити незалежну корекцію частотної характеристики системи тягового електропостачання в діапазонах низько та високочастотних гармонік. Структура такого ФКП представлена на рис. 1.3.

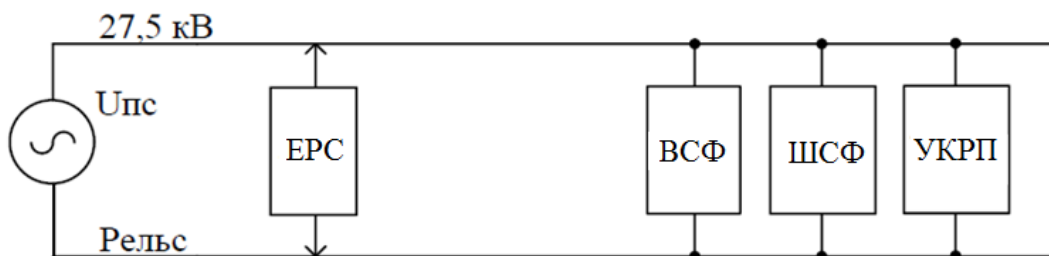


Рисунок 1.3 – Запропонована структура ФКП

На рисунку 1.3 вузькосмуговий фільтр (ВСФ) представляє резонансний ланцюг, що має мінімальний опір для низькочастотних гармонік. Він здійснює шунтування найпотужніших низькочастотних гармонік струму. У діапазоні високочастотних гармонік опір ВСФ має індуктивний характер і збільшується із зростанням частоти.

Широкосмуговий фільтр, що демпфує (ШСФ) повинен мати постійний опір на частотах, що перевищують 500 Гц. Це дозволить узгодити опір тягової мережі та ФКП у діапазоні високочастотних гармонік та за рахунок цього знизити

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

негативний вплив несинусоїдальних режимів тягового навантаження на пристрої нетягового електропостачання.

Модульна структура дозволяє формувати ФКП залежно від вимог щодо компенсації реактивної потужності, забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу із СТЕ, системами нетягового електропостачання на тяговій підстанції. У випадках, коли сумарний коефіцієнт гармонік напруги в тяговій мережі не перевищує нормативних значень, фільтр що демпфує можна виключити. Тобто перевагою такої модульної структури є те, що вона дозволяє змінювати склад ФКП з розвитком тягової підстанції.

Склад такого фільтрокомпенсуючого пристрою залежить від вимог щодо динамічної компенсації реактивної потужності, придушення низькочастотних гармонік та демпфування резонансних явищ в діапазоні високих частот. Необхідність модульної побудови визначається ще й тим, що вимоги до компенсаційних характеристик ФКП на кожній тяговій підстанції можуть бути різні.

Запропонована структура ФКП за рахунок розміщення окремих модулів у різних точках мережі дозволяє створювати розподілені системи управління якістю електроенергії і забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та нетягових споживачів.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

2.1 Пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої для систем з тяговим навантаженням

В системі тягового електропостачання крива струму якою живиться випрямляч електрорухомого складу має несинусоїдний характер. Спотворення струму викликає значне спотворення кривої напруги. Спектри несинусоїдальних струмів та напруг залежать від великої кількості факторів (число, кількість та розташування локомотивів, режим їх роботи). З ростом тягових навантажень гармонійні спотворення струму, а відповідно і напруги також збільшуються.

На сьогоднішній день, в мережах тягового електропостачання змінного струму для запобігання посиленню струмів вищих гармонік використовують установки поперечної ємнісної компенсації, які виконують у вигляді фільтрокомпенсуючих пристроїв. Найпростішим варіантом ФКП є батарея конденсаторів із послідовно включеним реактором. Одним із варіантів є одноланковий ФКП, схему якого показано на рис. 2.1. У такій схемі індуктивність реактора вибирають такою, щоб на частотах вищих гармонік опір ФКП мав індуктивний характер.

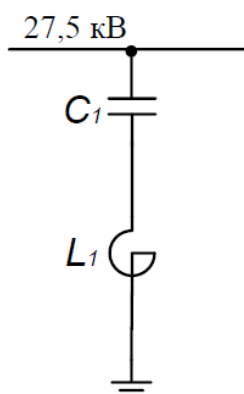


Рисунок 2.1 – Схема найпростішого одноланкового ФКП, що використовується в системах тягового електропостачання

Резонансна частота такого одноланкового фільтра визначається як:

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} . \quad (2.1)$$

За умов коли даний фільтрокомпенсуючий пристрій шунтує найбільш потужну 3 гармоніку тягового струму, резонансна частота контуру має становити 135...143 Гц.

Крім придушення гармонійних складових резонансний фільтр на рис. 2.1 забезпечує корекцію коефіцієнта потужності. Реактивна потужність такого ФКП на частоті основної гармоніки визначається як:

$$Q = \frac{U_0^2}{\sqrt{\omega_1 L_3 - \frac{1}{\omega_1 C_3}}} . \quad (2.2)$$

де ω_1 – частота основної гармоніки;

U_0 – напруга живильної мережі.

Напруга конденсатора:

$$U_c = U_0 + U_L = \frac{n^2 - 1}{n^2} U_0 \approx 1,125 U_0$$

Таким чином видно, що напруга на конденсаторі на 12,5% вища за напругу на фільтрокомпенсуючому пристрої.

На рис. 2.2 показано частотну характеристику найпростішого ФКП. На рис. 2.3 а,б показані частотні характеристики вхідного опору тягової мережі щодо струмоприймача ЕРС та коефіцієнта передачі струму в тягову мережу при включенні найпростішого ФКП. На рис. 2.4 представлена крива напруги на струмоприймачі ЕРС при застосуванні даного ФКП.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

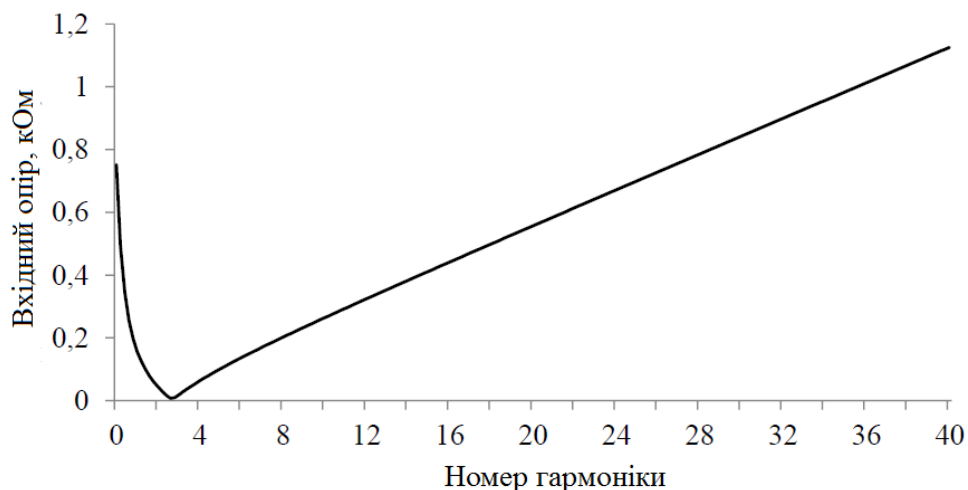


Рисунок 2.2 – Частотна характеристика найпростішого ФКП

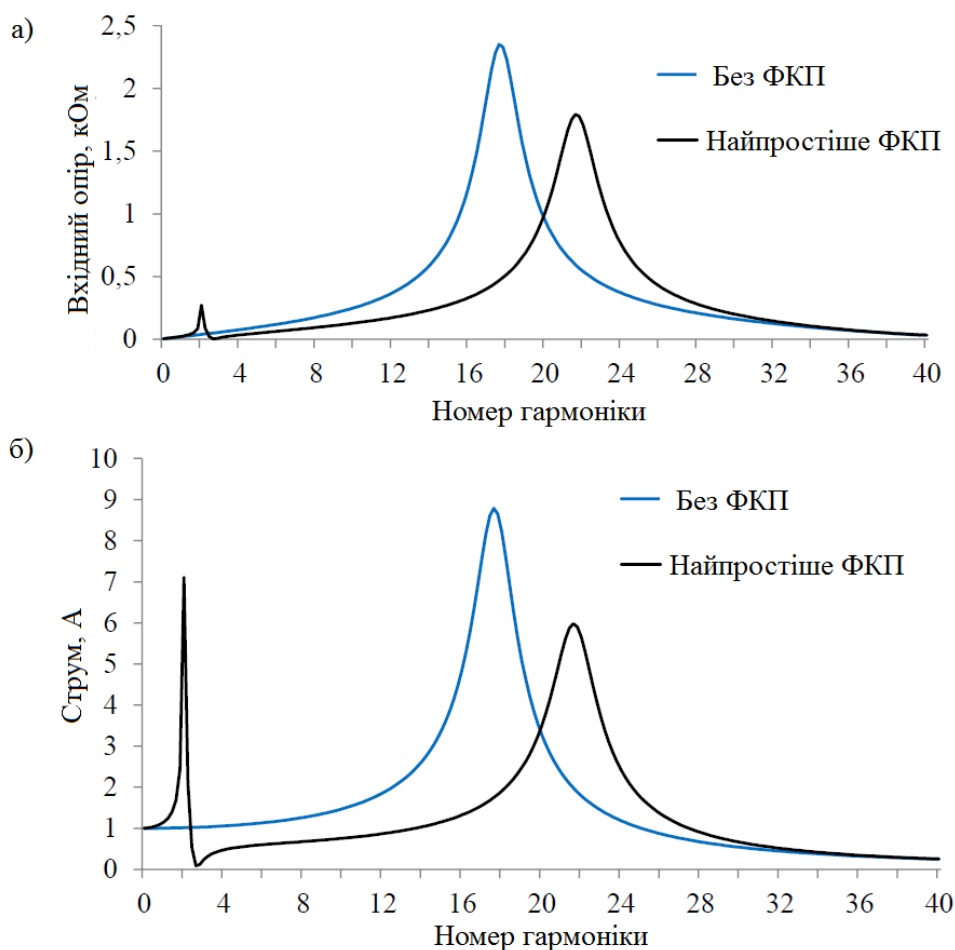


Рисунок 2.3 – Частотна характеристика вхідного опору тягової мережі щодо струмоприймача ЕРС (а) та коефіцієнт передачі струму до тягової мережі при включенні найпростішого ФКП (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

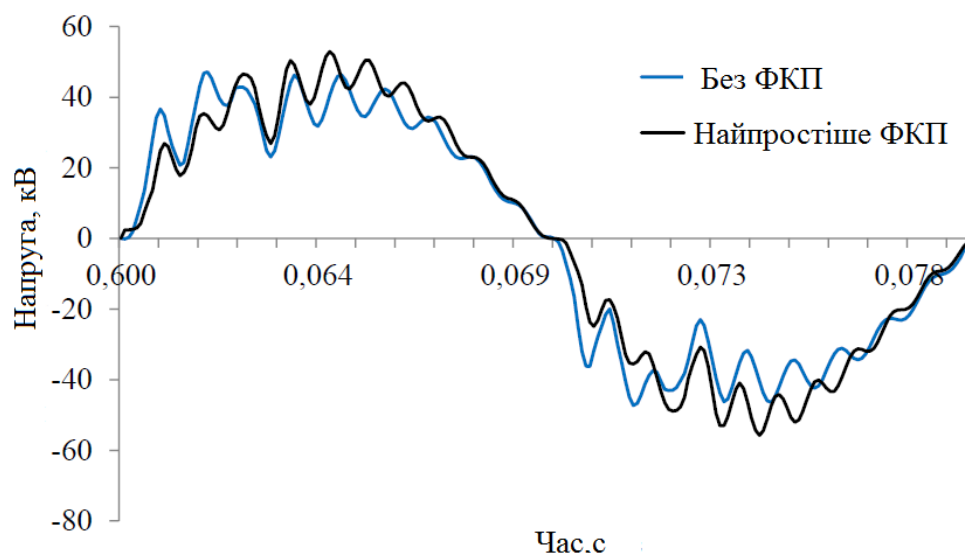


Рисунок 2.4 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при включенні найпростішого ФКП

Перевагою одноланкових ФКП є простота в експлуатації та обслуговуванні. Вони дають можливість покращити значення коефіцієнта потужності в системах тягового електропостачання та за рахунок цього підвищити напругу на струмоприймачі електрорухомого складу.

З рис. 2.2, 2.3, 2.4 випливає, що включення найпростішого ФКП на рис.2.1 не дозволяє послабити вищі гармоніки струму та напруги ($n \geq 5$) та демпфувати резонансні режими у тяговій мережі на частотах, що перевищують 800 Гц.

Відповідно до вимог нормативних документів [9] необхідно послаблення вищих та інших гармонік струму та напруги непарного порядку ($n=5, 7, \dots$). Для цього необхідні складніші схеми фільтрокомпенсуючих пристроїв, які можуть здійснювати одночасне придушення кількох гармонійних складових.

Одним із варіантів такого сучасного двосекційного фільтру є представлений на рис.2.5 ФКП, що забезпечує компенсацію реактивної потужності та придушення 3 та 5-ї гармонік [10]. Пристрій складається із двох паралельно включених секцій. Значення елементів данного двосекційного фільтрокомпенсуючого пристрою: $C_1=13,6$ мкФ; $C_2=12,9$ мкФ; $L_1=95$ мГн; $L_2=34$ мГн.

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

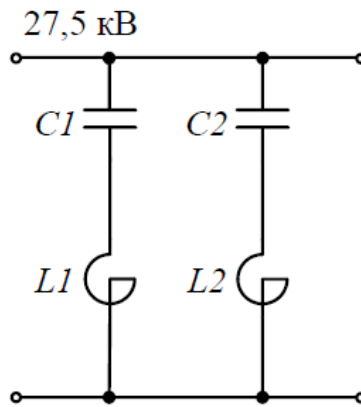


Рисунок 2.5 – Двосекційний фільтрокомпенсуючий пристрій

Частотна характеристика опору двосекційного ФКП представлена на рис.2.6. На рис. 2.7 показано частотну характеристику тягової мережі при встановленні фільтрокомпенсуючого пристрою на пості секціонування. На рис.2.8 представлена крива напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

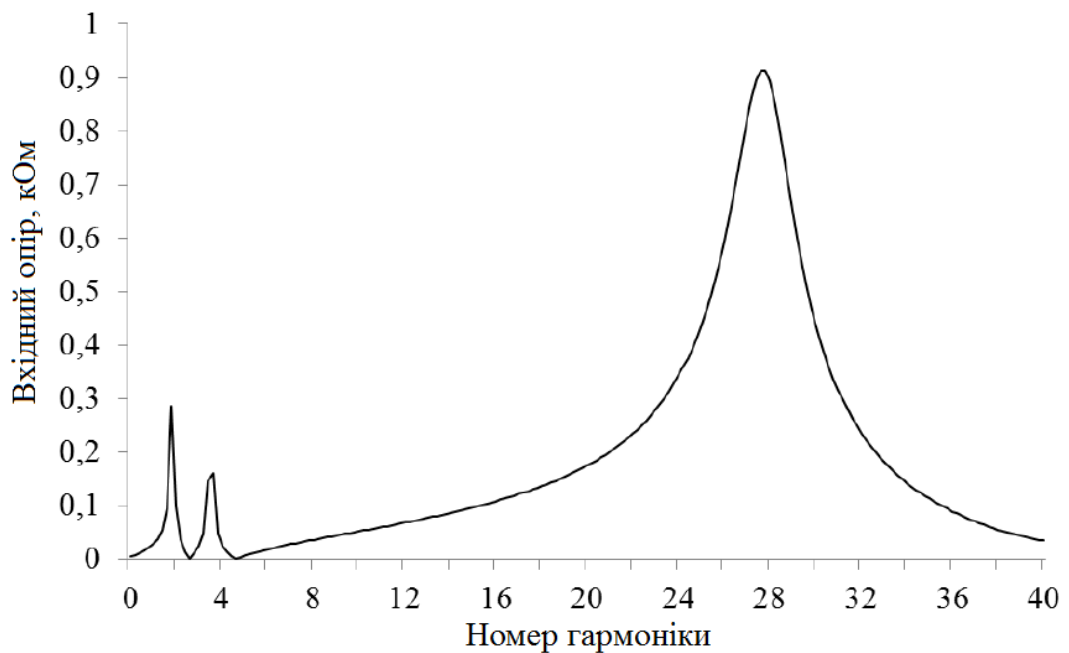


Рисунок 2.6 – Частотна характеристика опору двосекційного ФКП

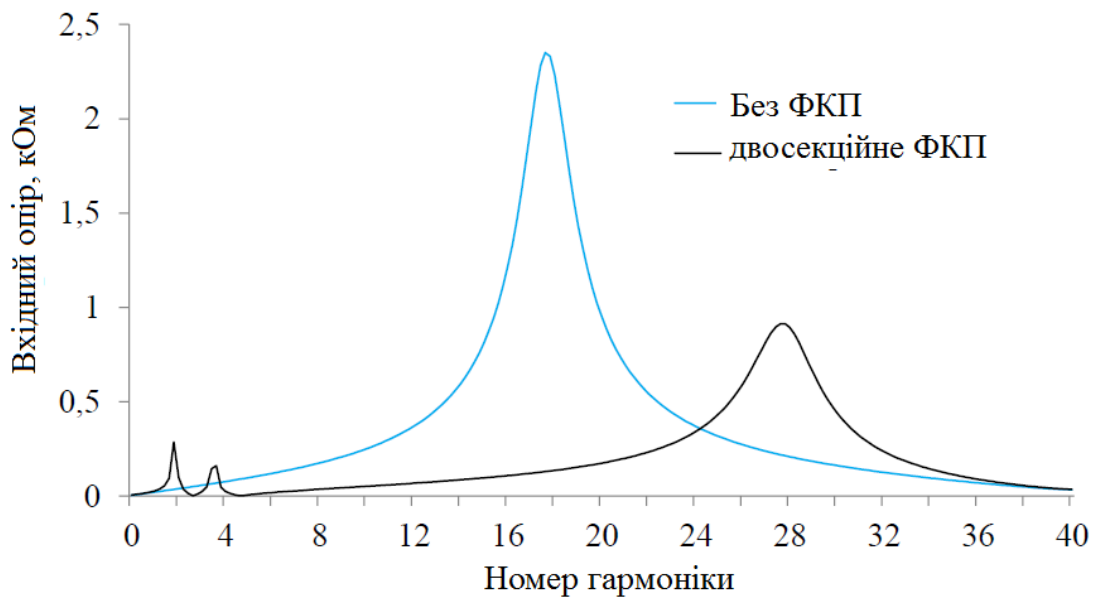


Рисунок 2.7 – Частотна характеристика опору СТЕ під час встановлення ФКП

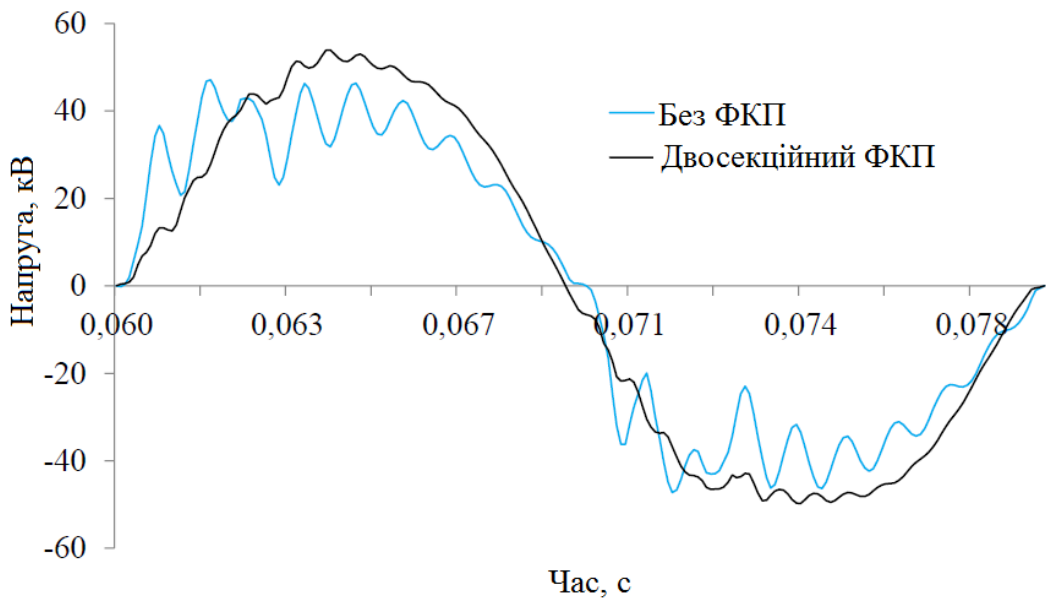


Рисунок 2.8 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при включенні двосекційного ФКП

Аналіз відомих ФКП дозволяє зробити висновок, що здебільшого вони здійснюють придушення лише низькочастотних гармонік. У той самий час розглянуті пристрої не можуть ефективно демпфувати резонансні режими, викликані хвильовими процесами в СТЕ. Включення вузькосмугових ФКП, налаштованих на придушення 3 і 5 гармонік може викликати посилення складових напруги і струму в діапазоні частот 1000...1500 Гц. Це призводить до посилення впливу тягової мережі, що заважає, на лінії нетягових споживачів.

2.2 Активні фільтрокомпенсуючі пристрої

Пасивні ФКП, які розглянуті вище, дають можливість придушення потужних низькочастотних гармонік та демпфірування в області високих частот резонансних режимів тягової мережі. При цьому пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої віддають в тягову мережу постійну реактивну потужність. Однак різко змінний характер тягового навантаження викликає коливання активної та реактивної потужностей, викиди та провали напруги мережі. При різкому скиданні навантаження або мінімальному навантаженні в системі електропостачання можуть виникати перенапруги. Для досягнення найбільш економічного режиму роботи тягової мережі, відповідно до вимог нормативних документів, необхідно застосовувати автоматичне регулювання реактивної потужності, що віддається ФКП. Таким чином, для нормалізації режиму напруги і зниження втрат електроенергії в СТЕ необхідна динамічна компенсація реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження. Фільтрокомпенсуючі пристрої мають містити швидкодіючий модуль, що у разі різких змін навантаження забезпечує плавне або ступінчасте регулювання реактивної потужності, що віддається [11].

На сьогоднішній день існують різні способи регулювання реактивної потужності ФКП. Перспективним напрямком є використання активних та гібридних силових фільтрів гармонік, статичних тиристорних компенсаторів, а також багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв, що забезпечують регулювання реактивної потужності, а також електромагнітну сумісність системи тягового електропостачання з нетяговими споживачами.

Розвиток сучасної елементної бази електроніки та методів широтно-імпульсної модуляції призвели до створення нового класу пристроїв, що дозволяють значно підвищувати якість електроенергії. Такі установки будуються на напівпровідникових пристроях, що повністю керуються, і можуть працювати в чотирьох квадрантах взаємного розташування векторів струму і напруги [12]. Такі перетворювачі отримали різні назви, в залежності від виконуваних ними функцій: активні фільтри, кондиціонери мережі, статичні

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компенсатори реактивної потужності (СТАТКОМ) [13]. Застосування керованих швидкодіючих ключів у таких пристроях дає можливість створювати необхідні компенсуючі струми з малим вмістом вищих гармонік.

Активний фільтр, схема якого представлена на рис. 2.9, забезпечує компенсацію реактивної потужності в системі тягового електропостачання та придушення потужних низькочастотних гармонійних складових (3, 5 та 7-ї).

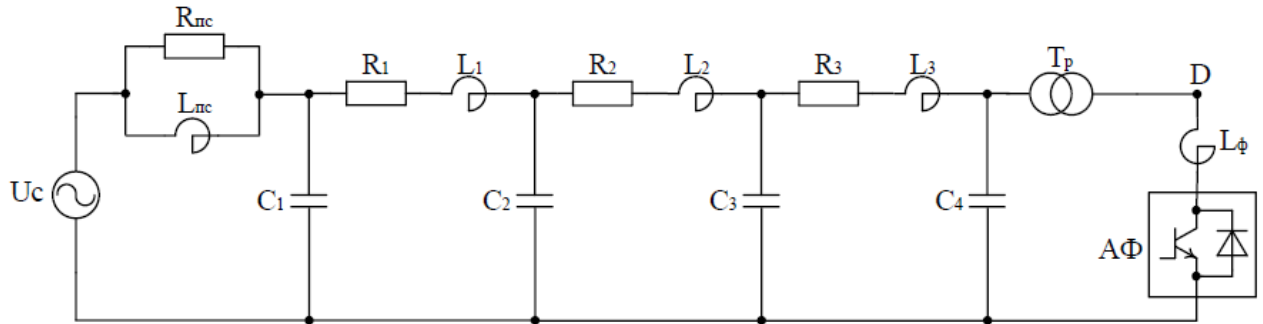


Рисунок 2.9 – Активний фільтр, встановлений наприкінці ділянки тягової мережі

Силова частина активного фільтра є багаторівневим інвертором напруги. В якості ключів використовуються біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) або тиристри з інтегрованим управлінням (IGCT). Робоча напруга таких пристроїв становить 6...6.5 кВ [14], тому активний фільтр підключається до тягової мережі через трансформатор.

На основі виміру напруги в місті підключення АФ до тягової мережі (точка D на рис. 3.1) виконується управління активним фільтром. При цьому виконується формування відповідного компенсуючого струму:

$$i_{\text{комп}} = KG(s)u_d,$$

де u_d – напруга в точці D;

$G(s)$ – результуюча передатна функція гребінки вузькосмугових фільтрів, що формують сигнал, пропорційний напругам 3, 5 та 7-й гармонійних складових:

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G(s) = N_3(s) + N_5(s) + N_7(s).$$

Тут $N_3(s), N_5(s), N_7(s)$ – передавальні функції смугово-пропускних фільтрів другого порядку, налаштованих на частоти відповідно 3, 5 та 7-ї гармонік.

Результати експериментальної перевірки, показують, що активний фільтр здійснює ефективну компенсацію реактивної потужності, збільшує середню напругу на струмоприймачі ЕРС та підтримує коефіцієнт форми напруги на рівні, близькому до значення 1,11, що має досить високий результат.

Недоліком розглянутого активного фільтра слід вважати те, що він послаблює лише низькочастотні гармоніки напруги. Для ослаблення високочастотних гармонійних складових тактова частота ключів має становити десятки кілогерців, що у сучасних умовах практично недосяжно [15].

Можливе застосування і гібридної компенсуючої системи для СТЕ, яка утворена паралельним з'єднанням активного фільтра, розглянутого вище, та широкосмугового пасивного фільтра (рис. 2.10). В такій схемі активний фільтр призначений для компенсації реактивної потужності та придушення низькочастотних гармонійних складових, а пасивний фільтр здійснює демпфування високочастотних гармонік [16].

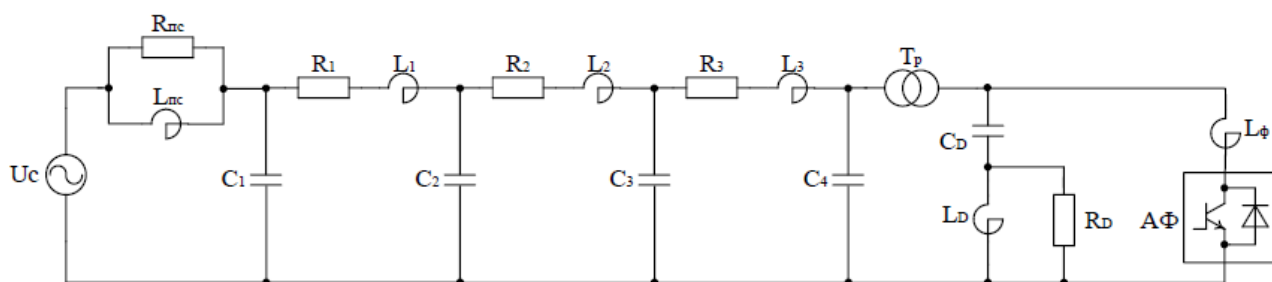


Рисунок 2.10 – Гібридний фільтрокомпенсуючий пристрій

Дана гібридна система також називається кондиціонером тягової мережі (Traction Power-Quality Conditioner).

Експериментальні результати досліджень, які проведені закордонними спеціалістами [17], підтверджують, що активні та гібридні фільтрокомпенсуючі

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристрої є перспективним засобом управління якістю електроенергії СТЕ. Вони можуть одночасно виконувати багато важливих функцій: компенсувати реактивну потужність, пригнічувати вищі гармоніки та демпфувати резонансні перенапруги на струмоприймачі ЕРС. Важливою перевагою активних фільтрів є те, що вони є адаптивні швидкодіючі пристрої, які здатні реагувати на зміни тягового навантаження в режимі реального часу [18].

Основний недолік кондиціонерів тягової мережі полягає в тому, що вони достатньо дорогі, потребують кваліфікованого обслуговування та спеціальної підготовки персоналу. Тому, на сьогоднішній день є лише нечисленні приклади реального застосування активних та гібридних фільтрів у тягових мережах. Досить часто роботи зі створення кондиціонерів тягової мережі поки обмежені дослідженням експериментальних моделей невеликої потужності [19].

2.3 Статичні тиристорні компенсатори для систем з тяговим навантаженням

Статичні тиристорні компенсатори (СТК) - це спеціалізовані компенсуючі пристрої, які призначені для компенсації реактивної потужності швидкодіючих нелінійних несиметричних навантажень електрифікованого залізничного транспорту.

СТК складається з паралельно включених реактора з тиристорним управлінням (РТУ) та пасивного ФКП, які приєднані до шин відповідної напруги через тиристорні ключі або вимикачі (рис. 2.11). Тиристорні ключі складаються з двох включених зустрічно-паралельно тиристорів. Тиристорний вентиль є основним елементом СТК, регулюючим струм компенсуючих реакторів і, відповідно, потужність СТК. Можливе включення реактора і фільтрокомпенсуючого пристрою через понижувальний трансформатор, що дає можливість забезпечити роботу тиристорів на зниженій напрузі [20].

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

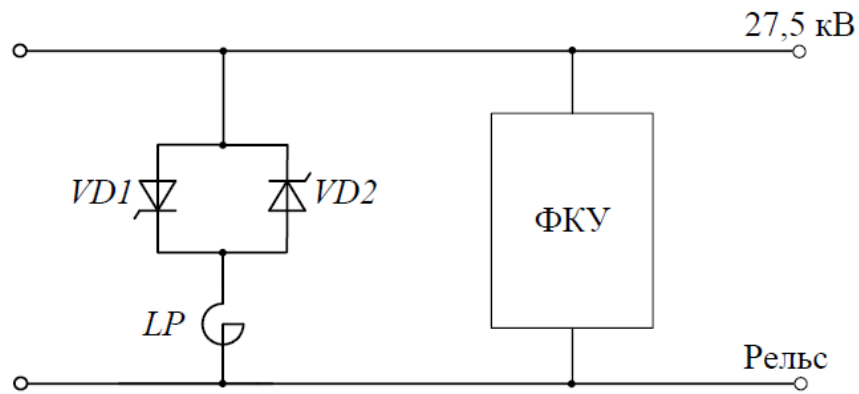


Рисунок 2.11 – Схема статичного тиристорного компенсатора

Реактивна потужність СТК визначається як різниця потужностей ФКП та реактора.

Найважливішою перевагою статичних тиристорних компенсаторів над іншими типами конденсаторних установок є можливість поліпшення показників якості електроенергії. Фільтри, якими оснащуються СТК, усувають вміст вищих гармонік в мережі, а висока швидкодія в межах 4.4...20 мс, завдяки застосуванню тиристорних ключів, забезпечує зниження дози фліккера і провалів напруги в мережі.

Основна функція СТК – стабілізація напруги та регулювання реактивної потужності. Також вони можуть використовуватися для підвищення пропускної спроможності та обмеження комутаційних перенапруг [21].

Установка СТК в одному або кількох вузлах енергосистеми дозволяє підвищити пропускну здатність ЛЕП, знизити втрати, стабілізувати напругу приймального кінця лінії.

Керуючими елементами у схемі на рис. 2.11 є зустрічно включені тиристори. Тиристор може бути переведений у провідний стан керуючим імпульсом. Замикається тиристор після переходу струму через нульове значення. У замкненому стані залишається до подачі повторного керуючого імпульсу.

Для регулювання струму РТУ використовується імпульсно-фазове керування тиристорами [22]. Амплітуда основної гармоніки струму в реакторі залежить від кута відмикання тиристора α . При $\alpha = 90^0$ реактор має максимальну провідність, а крива струму має синусоїдальну форму. Зменшення кута α призводить до

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення складової струму з частотою першої гармоніки. Це еквівалентно збільшенню еквівалентної індуктивності реактора та зниженню його реактивної потужності. Таким чином, реактор з тиристорним управлінням є керованим опором.

При зміні кута відмикання виконується варіювання величини першої гармоніки струму компенсатора, але можуть з'явитися вищі гармоніки струму непарних порядків [23]. Для компенсації вищих гармонік, які створюються РТУ, до складу СТК необхідно включати пасивний фільтр.

Найпростіший статичний тиристорний компенсатор для систем тягового електропостачання, що включає РТУ та вузькосмуговий фільтр, налаштований на частоту третьої гармоніки, показано на рис. 2.12.

Розглянутий статичний компенсатор дозволяє підтримувати в заданих межах напругу контактної мережі, довжиною 50 км. Одноланковий фільтр забезпечує придушення третьої гармоніки, створюваної як РТУ, так і електрорухомим складом. СТК покращує також форму кривої напруги, знижуючи коефіцієнт форми кривої до значень, що не перевищують 1,15 [24].

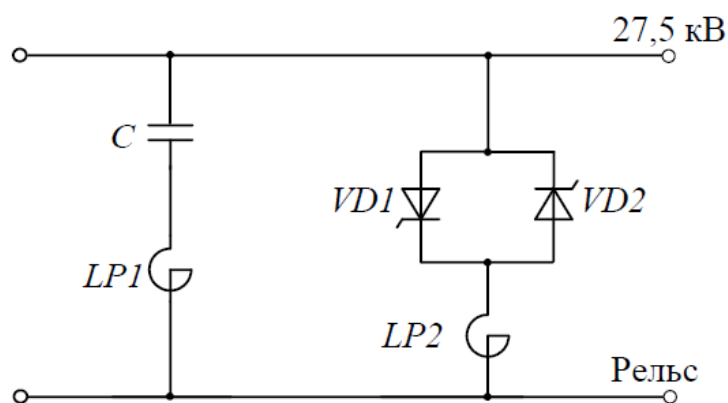


Рисунок 2.12 – Схема найпростішого тиристорного компенсатора для СТЕ

На сьогоднішній день існує багато перспективних компенсуючих пристроїв, один з яких показаний на рис 2.13 та представляє собою статичний тиристорний компенсатор, утворений реактором з тиристорним управлінням (РТУ) і силовим пасивним фільтром. Даний РТУ утворений зустрічно включеними тиристорами і здвоєним реактором. Пасивний фільтр складається з вузькосмугової секції,

налаштованої на частоту третьої гармонійної складової, і найпростішої широкосмугової секції першого порядку. Реактивна потужність такого компенсуючого пристрою дорівнює різниці потужностей реактора та пасивного фільтра.

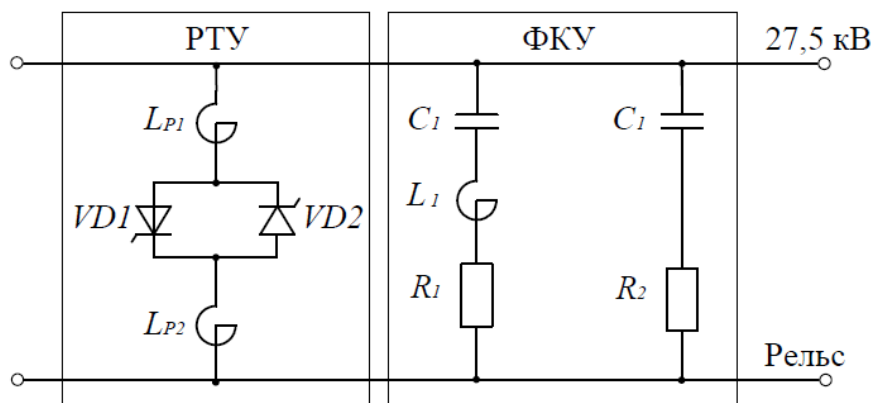


Рисунок 2.13 – Статичний тиристорний компенсатор для системи тягового електропостачання

На частоті основної гармоніки опір пасивного фільтра має ємнісний характер і фільтр генерує в мережу задану величину реактивної потужності. Включення реактора зменшує реактивну потужність, що віддається пристроєм. Використання СТК як пристрою поперечної ємнісної компенсації дозволяє забезпечити плавне регулювання реактивної потужності, зменшити величину визначених гармонік, а також дає можливість стабілізувати напругу в тяговій мережі.

Основне призначення даного СТК, полягає у забезпеченні можливості в регулюванні напруги у тяговій мережі [25]. Силовий фільтр, що входить до складу такого статичного тиристорного компенсатора, призначений для придушення вищих гармонік струму, створюваних РТУ. Частота зрізу широкосмугового фільтра складає понад 1500 Гц, тому фільтр не забезпечує узгодження опору тягової мережі частотах 500...1200 Гц, де можуть спостерігатися резонансні режими. На рис. 2.14 показано частотні характеристики системи тягового електропостачання при встановленні фільтра, який зображений на рис. 2.13, при знаходженні ЕРС наприкінці ділянки тягової

мережі. Відповідно до рис. 2.14 частотні характеристики СТЕ мають максимуми на частотах, близьких до 250 чи 350 Гц, що викликає посилення відповідних гармонік.

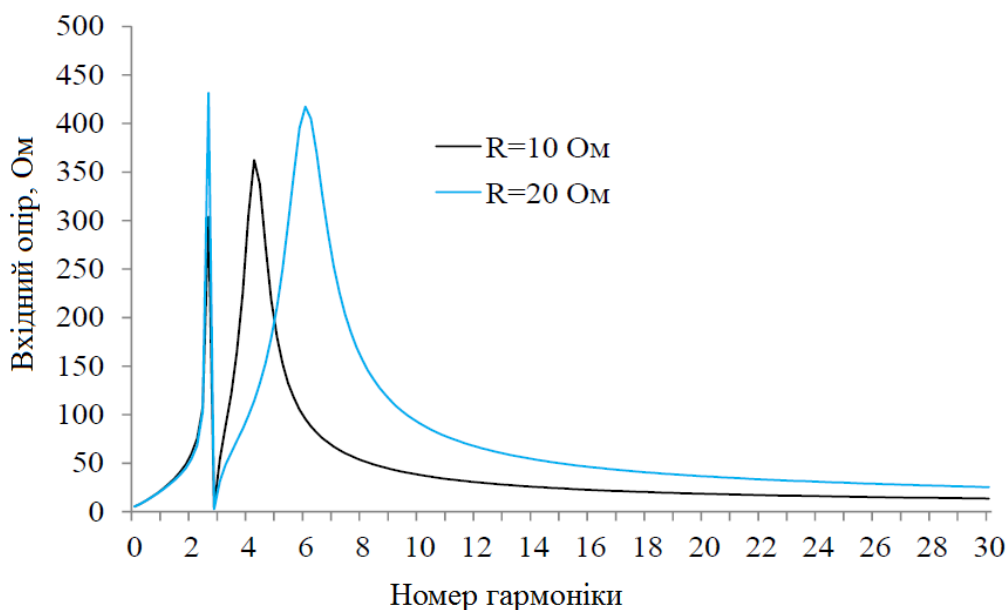


Рисунок 2.14 – Частотні характеристики системи тягового електропостачання

Таким чином, проведений аналіз показує, що найпростіший силовий фільтр гармонік, що входить до складу СТК представленого на рис. 2.13, не може забезпечити електромагнітну сумісність електрорухомого складу та тягової мережі. Для цього необхідні фільтрокомпенсуючі пристрої складнішої структури, що забезпечують електромагнітну сумісність РТУ та ЕРС як із системою тягового електропостачання, так і з пристроями зв'язку, телемеханіки та іншими не тяговими споживачами.

Ще одним недоліком розглянутого компенсуючого пристрою є порівняно висока вартість. Загальна вартість такого статичного тиристорного компенсатору значно перевищує питому вартість некерованих пристроїв компенсації реактивної потужності. Крім того, для систем тягового електропостачання швидкодія СТК не має вирішального значення.

Проаналізувавши дані пристрої можна зробити висновок, що з техніко-економічного розрахунку, для тягових мереж вітчизняних залізниць застосування СТК пов'язані з великими капітальними вкладеннями. Тому, в

даний час, з техніко-економічних причин у системах тягового електропостачання вітчизняних залізниць доцільно застосовувати установки поперечної ємнісної компенсації, що забезпечують ступінчасте регулювання реактивної потужності.

2.4 Багатофункціональні фільтрокомпенсуючі пристрої

Варіанти багатофункціональних ФКП які забезпечують електромагнітну сумісність системи тягового електропостачання з нетяговими пристроями та гарантують корекцію частотних характеристик системи «ФКП – реактор – тягова мережа» у всьому діапазоні частот показано на рис. 2.15, 2.16. ФКП на рис. 2.15, 2.16 утворено паралельно включеним вузькосмуговим фільтром, налаштованим на придушення 3 і 5-й гармонійних складових, широкосмугової демпфуючої секції, другого порядку і реактором з тиристорним управлінням. В обох варіантах широкосмугова секція реалізує максимально плоску характеристику із частотою зрізу 300 Гц.

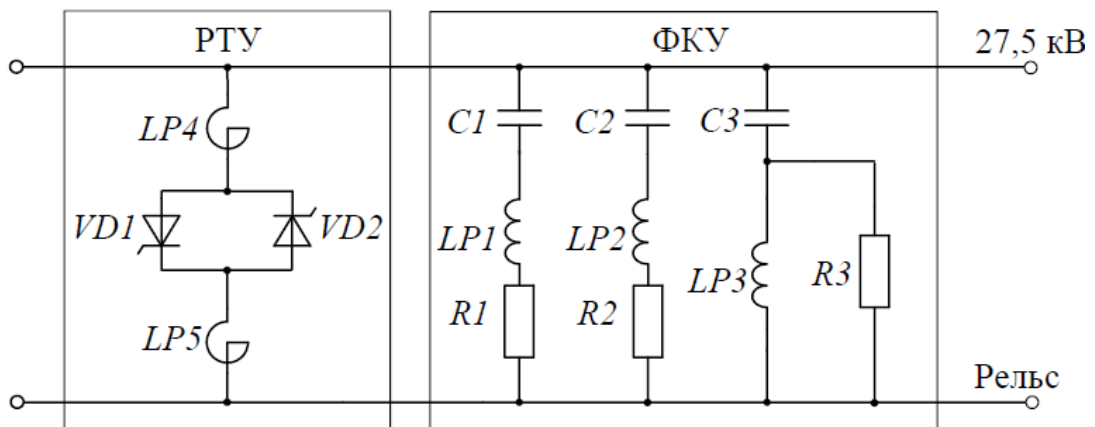


Рисунок 2.15 – Багатофункціональний ФКП

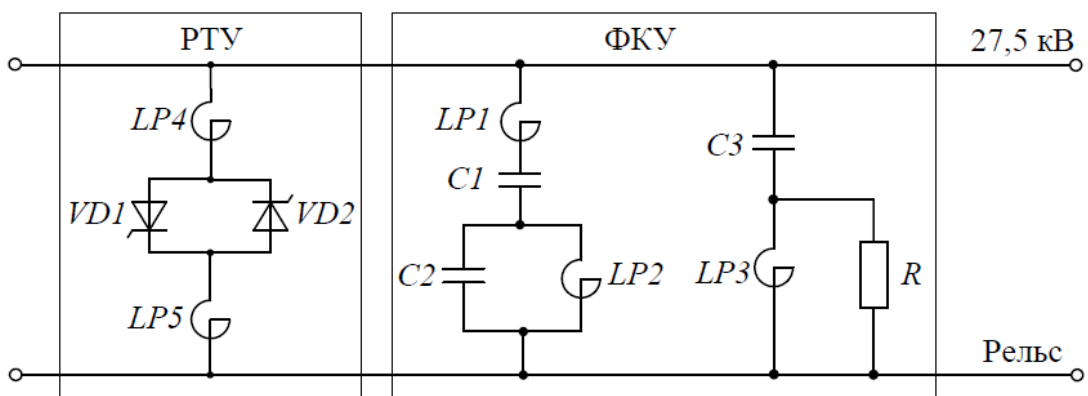


Рисунок 2.16 – Багатофункціональний ФКП

Порівняно із СТК на рис. 2.13 широкопasmова ланка другого порядку дає можливість зменшити втрати на частоті основної гармоніки.

ФКП у схемі на рис. 2.15 містить дві вузькосmугові та широкопasmову демпфуючу ланку. Даний пристрій дає можливість послаблення найпотужніших 3 і 5 гармонійних складових, а також демпфує резонансні режими в діапазоні частот, що перевищують 300 Гц.

У схемі на рис. 2.16 дворезонансна ланка, налаштована на частоти 3 та 5-ї гармонік, реалізована першою схемою Фостера.

На рис. 2.17 показано частотну характеристику системи тягового електропостачання з ФКП (рис. 2.15), встановленим на пості секціонування.

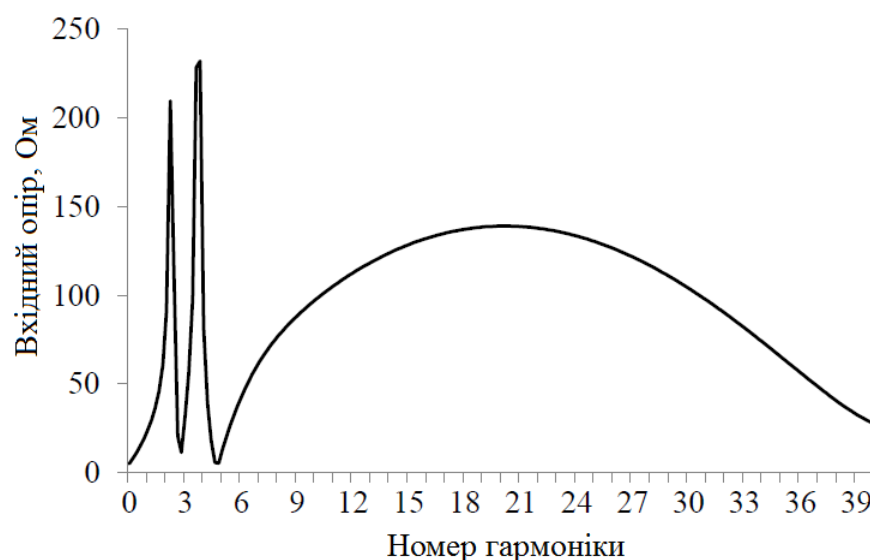


Рисунок 2.17 – Частотна характеристика системи тягового електропостачання

На рис. 2.18 показано криву напруги на струмоприймачі ЕРС при установці такого багатофункціонального ФКП.

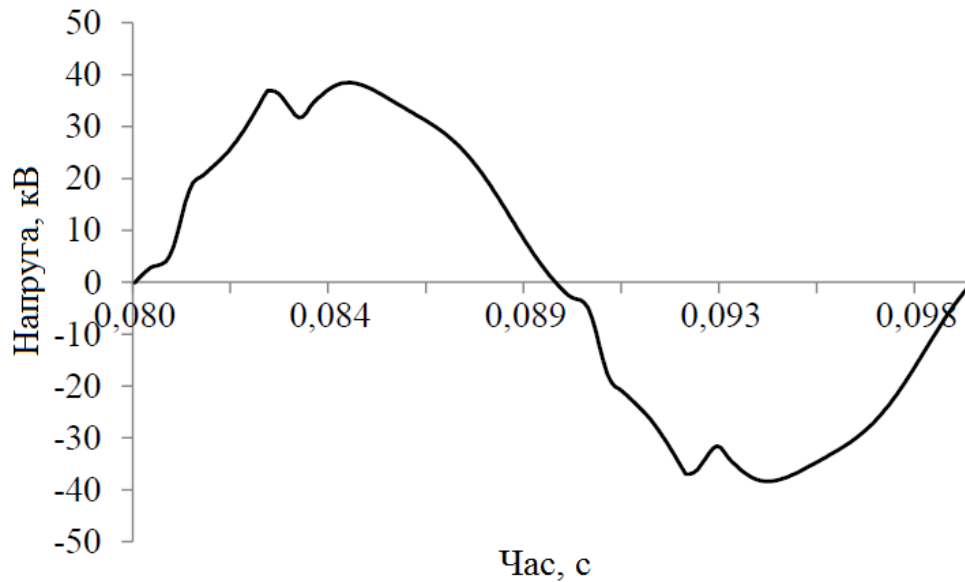


Рисунок 2.18 – Напруга на струмоприймачі ЕРС

Проведений аналіз показує, що встановлення реактора з тиристорним управлінням і пропонованих ФКП дозволяє здійснювати плавне регулювання реактивної потужності в системі тягового електропостачання. При цьому майже відсутні кидки струму та напруги при регулюванні та відбувається суттєве зменшення їх гармонійних складових. Одночасно забезпечується електромагнітна сумісність системи тягового електропостачання з системами радіозв'язку, автоматики, ланцюгами живлення пристроїв телемеханіки та іншими нетяговими споживачами.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою для системи з тяговим навантаженням змінного струму

Для визначення та дослідження нових перспективних варіантів фільтрокомпенсуючих пристроїв та у відповідності з необхідними вимогами до них існує необхідність в якісно нових підходах розрахунку і аналізу основних параметрів даного обладнання.

Основними вимогами які ставляться до сучасного ФКП є виконання наступних функцій:

1. Компенсація реактивної потужності на частоті основної гармоніки;
2. Пригнічення найпотужніших низькочастотних гармонік струму в контактній мережі;
3. Обмеження резонансних перенапруг;
4. Забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання із нетяговими споживачами.

Для розрахунку модулів ФКП перспективною є методика розрахунку пасивних ФКП, що забезпечують електромагнітну сумісність ЕРС із системою тягового електропостачання, а також із системами зв'язку, пристроями автоматики та телемеханіки та іншими нетяговими споживачами.

Для дослідження компенсаційних характеристик проєктованих пристроїв систему «ФКП – тягова мережа» можна представити у вигляді Г-подібного чотириполюсника, на зовнішніх затискачах якого діють джерела гармонік струму та напруги (рис. 3.1).

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

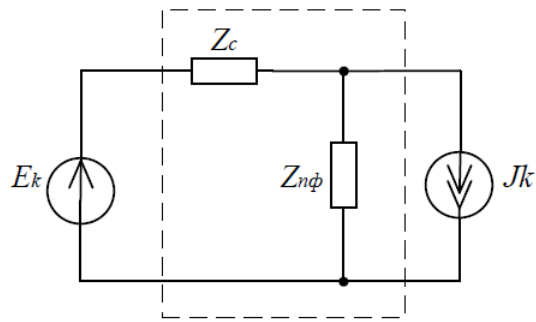


Рисунок 3.1 – Модель системи «ФКП – тягова мережа»

Для опису даного чотирьохполюсника можна використати рівняння у гібридних параметрах:

$$\begin{bmatrix} I_c \\ U_{\text{топ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ J_k \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

Тут $F_{11}(j\omega) = I_c / E_k$ – вхідна провідність системи фільтр – тягова мережа з боку зовнішнього джерела гармонік;

$F_{12}(j\omega) = I_c / J_k$ – коефіцієнт передачі k-ї гармоніки струму в тягову мережу, створюваної перетворювачем ЕРС;

$F_{21}(j\omega) = U_{\text{топ}} / E_k$ – коефіцієнт передачі k-ї гармоніки напруги;

$F_{22}(j\omega) = U_{\text{топ}} / J_k$ – опір системи тягового електропостачання щодо струмоприймача ЕРС.

Коефіцієнти $F_{12}(j\omega)$ і $F_{22}(j\omega)$ визначають розподіл струму k-ї гармоніки між фільтром та тяговою мережею. В даному випадку для коефіцієнтів розподілу справедлива рівність:

$$|F_{12}(j\omega)|^2 + |F_{22}(j\omega)|^2 = 1.$$

Для схеми на рис. 3.1 матриця гібридних параметрів визначається як:

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} & -\frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} \\ \frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} & \frac{Z_{\text{пф}} Z_{\text{с}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

З формули (3.2) слідує, що на передачу струму k -ї гармоніки в тягову мережу впливають не тільки характеристики фільтра, а й частотна характеристика системи тягового електропостачання. Для ефективного придушення струму чи напруги k -ї гармоніки значення коефіцієнта $F_{ij}(j\omega)$ на частоті цієї гармоніки має бути близько до нуля.

Оскільки аналізовані фільтрокомпенсуючі пристрої є пасивні двополюсники, то зручним засобом дослідження їх характеристик є теорія синтезу LC-ланцюгів. Для аналізу конфігурацій ФКП та розробки загальних методів реалізації таких пристроїв розглянемо основні положення даної теорії.

Відомо, що функція вхідного опору реактивного двополюсника визначається як:

$$Z_{\phi}(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (3.3)$$

Тут ω_{zi} і ω_{pj} – нулі та полюси вхідної функції, s – комплексна частотна змінна. Постійну H називають коефіцієнтом нормування.

Операторна провідність реактивного двополюсника визначається виразом:

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}.$$

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матриця гібридних параметрів (3.2) враховуючи формулу (3.3) набуде нового вигляду:

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & -\frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} \\ \frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & \frac{N(s)Z_c}{N(s) + D(s)Z_c} \end{bmatrix}.$$

З останньої формули випливає, що на частотах нулів вхідного опору ФКП коефіцієнт передачі струму до тягової мережі $F_{12}(s) = 0$. На частотах полюсів $Z_\phi(s)$ значення $F_{12}(s)$ рівні одиниці. Паралельні резонанси між індуктивним опором мережі та гілками фільтра спостерігаються на тих інтервалах частотної осі, де опір фільтра має ємнісний характер. Ці інтервали визначаються власними частотами фільтра.

Методи синтезу реактивних двополосників засновані на розкладанні функції $Z(s)$ або $Y(s)$ на суму елементарних доданків (метод Фостера) або ланцюговий дріб (метод Кауера). Кожен доданок реалізується найпростішим паралельним або послідовним ланцюгом.

Перша схема Фостера відповідає розкладу функції вхідного опору LC-двopolосника на суму простих дробів, що визначається виразом:

$$Z(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j s}{s^2 + \omega_{pi}^2}. \quad (3.4)$$

Тут $k_\infty = \left. \frac{Z(s)}{s} \right|_{s \rightarrow \infty}$ – відрахування, що відповідає полюсу в нескінченності.

Відрахування у полюсах ω_{pi} знаходять за допомогою формули:

					02.15.EE2326.PD.2024–ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_j = \left. \frac{(s^2 + \omega_{pi}^2)Z(s)}{s} \right|_{s^2 \rightarrow -\omega_{pi}^2} .$$

Формулі (3.4) відповідає послідовне з'єднання елементарних двополюсників (рис. 3.2). Індуктивний елемент L_1 реалізує полюс вхідного опору в нескінченності, а ємнісний елемент C_1 реалізує полюс $Z(s)$ на початку координат при $s = 0$. Доданком другого порядку відповідають паралельні коливальні контури.

Параметри контурів знаходять за формулами:

$$C_j = \frac{1}{k_j} ; L_j = \frac{k_j}{\omega_{pi}^2} . \quad (3.5)$$

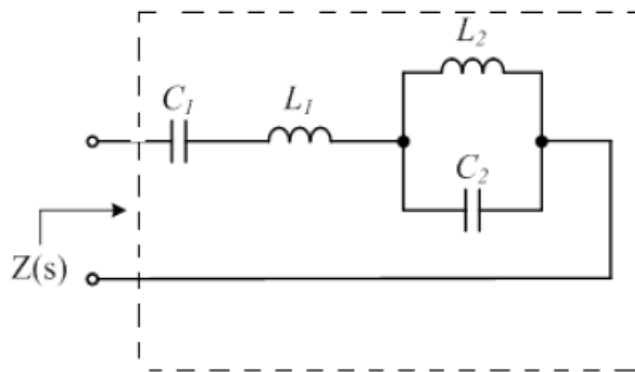


Рисунок 3.2 – Перша канонічна схема Фостера

Друга схема Фостера заснована на розкладанні функції вхідної провідності реактивного двополюсника. Подаємо провідність $Y(s)$ у вигляді суми доданків:

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pi}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)} = \sum_{i=1}^n \frac{k_j s}{s^2 + \omega_{zi}^2} . \quad (3.6)$$

Формулі (3.6) відповідає структура, утворена паралельним з'єднанням послідовних коливальних контурів, що мають резонансні частоти ω_{zi} (рис. 3.3). Значення елементів коливальних контурів визначаються як:

$$L_j = \frac{1}{k_j}; C_i = \frac{k_j}{\omega_{zi}^2}. \quad (3.7)$$

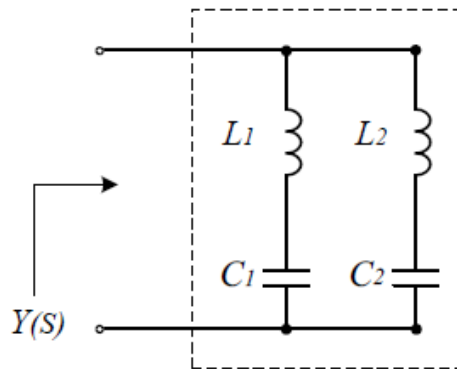


Рисунок 3.3 – Друга канонічна схема Фостера

Для розрахунку дворезонансних фільтрів взято за основу канонічні схеми Фостера чи Кауера, вихідними даними для такого розрахунку є частоти гармонік, що пригнічуються та реактивна потужність фільтра.

Розрахунок фільтра виконується у наступному порядку.

1. Визначаються параметри операторного опору $Z_{\text{вх}}(s)$, нормованого для частоти основної гармоніки. Частоти нулів $Z_{\text{вх}}(s)$ доцільно вибирати на 5... 10 % менше частот гармонік що пригнічуються. Частоти полюсів функції опору $Z_{\text{вх}}(s)$ слід вибирати рівними частотам парних гармонік. Це дозволить виключити резонансне посилення неканонічних парних гармонік. Коефіцієнт H у формулі (3.4) визначається за умови:

$$H = \frac{U_{\phi}^2}{QZ'_{\text{вх}}(j1)}.$$

2. Розкладається функція операторного опору або провідності на суму найпростіших доданків (схеми Фостера) або в ланцюговий дріб (схема Кауера).

3. За допомогою формул (3.5, 3.7) розраховуються нормовані значення елементів вибраної схеми L_{i^*} , C_{i^*} .

4. Проводиться денормування значень елементів щодо частоти основної гармоніки: $C_i = C_{i^*} / 314$, $L_i = L_{i^*} / 314$.

Розглянутий метод розрахунку дозволяє отримати ФКП у формі канонічних реалізацій реактивних двополіусників. Фільтрокомпенсуючі пристрої, які отримуються в результаті розрахунку, мають мінімальну кількість елементів. Вони забезпечують придушення потужних непарних гармонік і в той же час унеможливають посилення неканонічних парних гармонік.

У відповідності з даною методикою, для дослідної ділянки з тяговим навантаженням змінного струму необхідно розрахувати ФКП з реактивною потужністю 2,8 Мвар. ФКП має здійснювати придушення 3 та 5-ї гармонік, а також мати можливість демпфування резонансних режимів на частотах, що перевищують 500 Гц. Для регулювання реактивної потужності передбачено встановлення реактора з тиристорним управлінням.

Використавши розглянутий метод розрахунку модулів фільтрокомпенсуючих пристроїв отримали варіанти нових ФКП, які показані на рис.3.4, 3.5. Потужності фільтрів однакові та рівні 2,8 МВАр. Кожний ФКП включає вузькосмуговий фільтр, налаштований на частоти третьої і п'ятої гармонік, а також широкосмугову ланку третього порядку, що демпфує, з частотою зрізу 350 Гц. У схемі на рис. 3.4 (варіант 1) вузькосмуговий фільтр реалізовано за допомогою першої схеми Фостера. У другому варіанті, представленому на рис.3.5, для реалізації вузькосмугового фільтру використано другу схему Фостера. Значення елементів нових багатофункціональних ФКП наведено у табл. 3.1.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

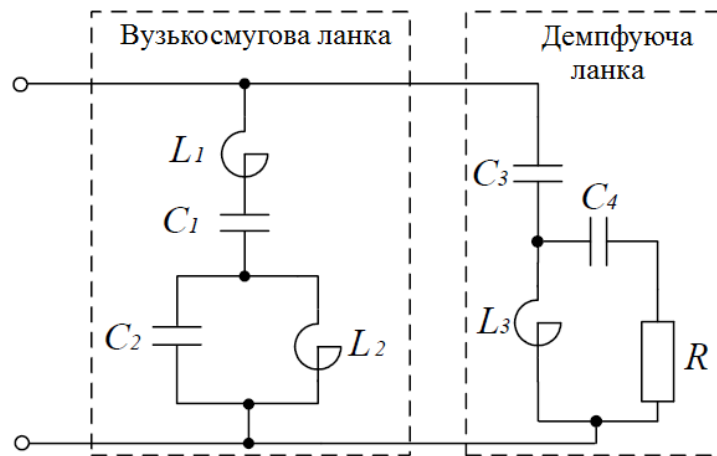


Рисунок 3.4 – Схема багатofункціонального ФКП (варіант 1)

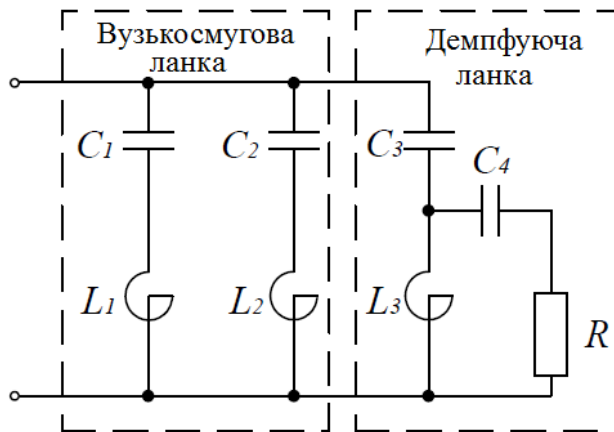


Рисунок 3.5 – Схема багатofункціонального ФКП (варіант 2)

Для порівняння у табл. 3.1 включено значення елементів ФКП, що серійно випускається сучасною промисловістю (рис. 3.6).

Проаналізувавши дані з табл. 3.1 видно, що варіант компенсуючого пристрою з вузькосмуговим фільтром на основі другої схеми Фостера (варіант 2) має мінімальну сумарну ємність конденсаторів у порівнянні з іншими двома схемами. Це є важливою техніко-економічною перевагою, оскільки зменшує вартість ФКП. Також важливою перевагою є те, що потрібна менша площа для розміщення обладнання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

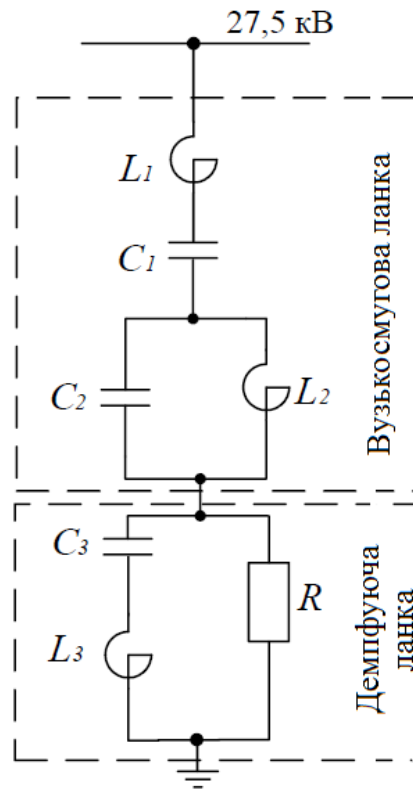


Рисунок 3.6 – Схема ФКП сучасного виробництва

Таблиця 3.1 – Значення елементів фільтрокомпенсуючих пристроїв

Параметри	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	R4, Ом
Варіант 1	8,3	26,75	2,47	7,41	102,4	23,7	62,5	150
Варіант 2	6,2	2,03	2,47	7,41	200	212	62,5	150
Сучасна ФКП	11,18	72,3	361,2	-	50,35	11,9	28,05	77

Ще однією перевагою схеми ФКП на рис. 3.5 є можливість незалежного регулювання резонансних частот контурів, налаштованих на придушення 3 і 5 гармонік.

3.2 Аналіз частотних та часових характеристик фільтрокомпенсуючих пристроїв

Для порівняння та аналізу отриманих та існуючих фільтрокомпенсуючих пристроїв, за допомогою програми схемотехнічного моделювання Pspice розраховано частотні та часові характеристики даних установок. На рис. 3.7 представлені частотні характеристики ФКП сучасного виробництва (крива 1) та запропонованих нових варіантів (крива 2).

Відповідно до рис. 3.7 опір ФКП сучасного виробництва у діапазоні понад 500 Гц має індуктивний характер і лінійно зростає зі збільшенням частоти, тому узгодити опір ФКП з хвильовим опором контактної мережі у широкому діапазоні частот неможливо. У той самий час опір запропонованих нових варіантів ФКП на частотах понад 350 Гц майже постійний.

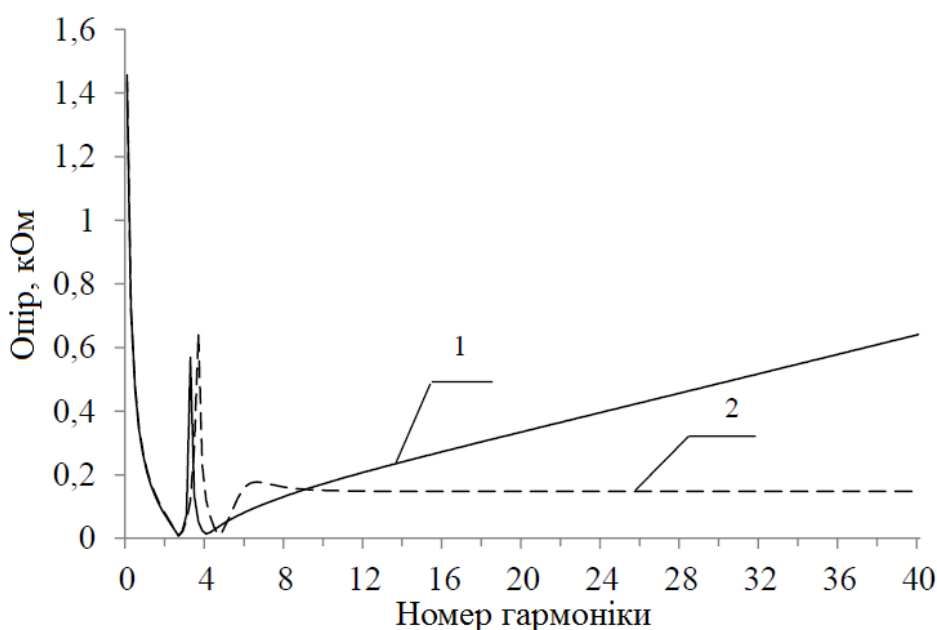


Рисунок 3.7 – Частотні характеристики опорів сучасного ФКП (крива 1) та запропонованих нових варіантів (крива 2)

На рис. 3.8 показані частотні характеристики опору ділянки тягової мережі з фільтрокомпенсуючими пристроями, які встановлені на посту секціонування. Довжина дослідної ділянки складає 30 км. Тягова мережа представлена моделлю у формі каскадної сполуки П-подібних чотириполісних секцій. Кожна секція відповідає ділянці тягової мережі завдовжки 10 км.

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частотні характеристики СТЕ після встановлення запропонованих нових фільтрокомпенсуючих пристроїв (крива 2) мають значно пологішу форму в області високих частот, ніж у разі використання ФКП сучасного виробництва (крива 1). На частотах вищих гармонік величина опору системи тягового електропостачання після встановлення запропонованих ФКП зменшилася більш ніж в 10 разів, що дозволяє виключити резонансне посилення високочастотних гармонік. За рахунок цього знижується вплив ЕРС на лінії зв'язку, пристрої автоматики і телемеханіки, чутливе електронне обладнання та інші нетягові споживачі.

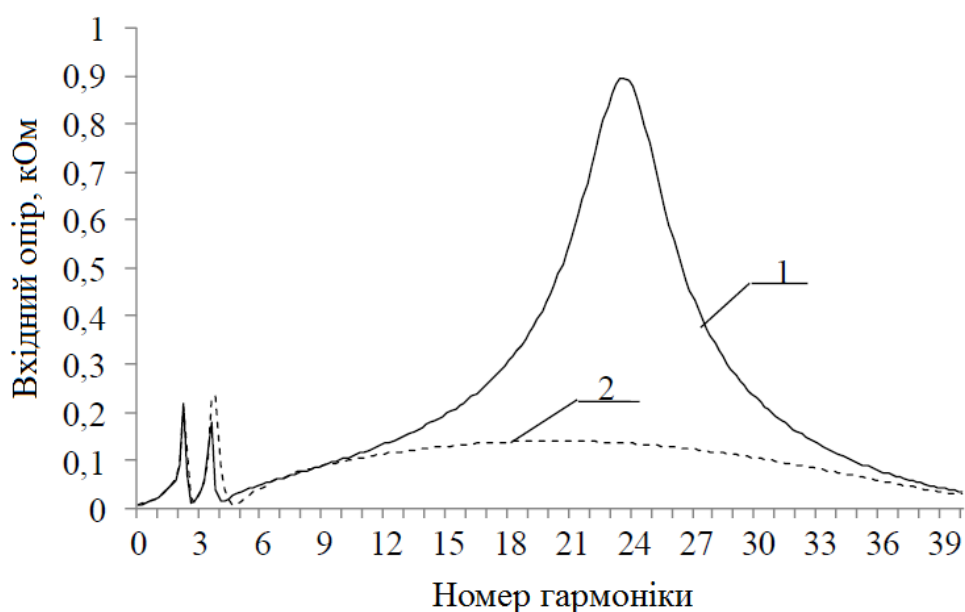


Рисунок 3.8 – Частотна характеристика системи тягового електропостачання після встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв

На рис. 3.9 представлені криві напруги на струмоприймачі електрорухомого складу. Крива 3 – без встановлення ФКП у тягову мережу. Крива 1 – із встановленням ФКП сучасного виробництва. Крива 2 – із встановленням запропонованих нових фільтрокомпенсуючих пристроїв. Дійсне значення струму ЕРС дорівнює 370 А. Після встановлення запропонованих ФКП сумарний коефіцієнт гармонік напруги на струмоприймачі ЕРС знизився з 32% до 6,5%.

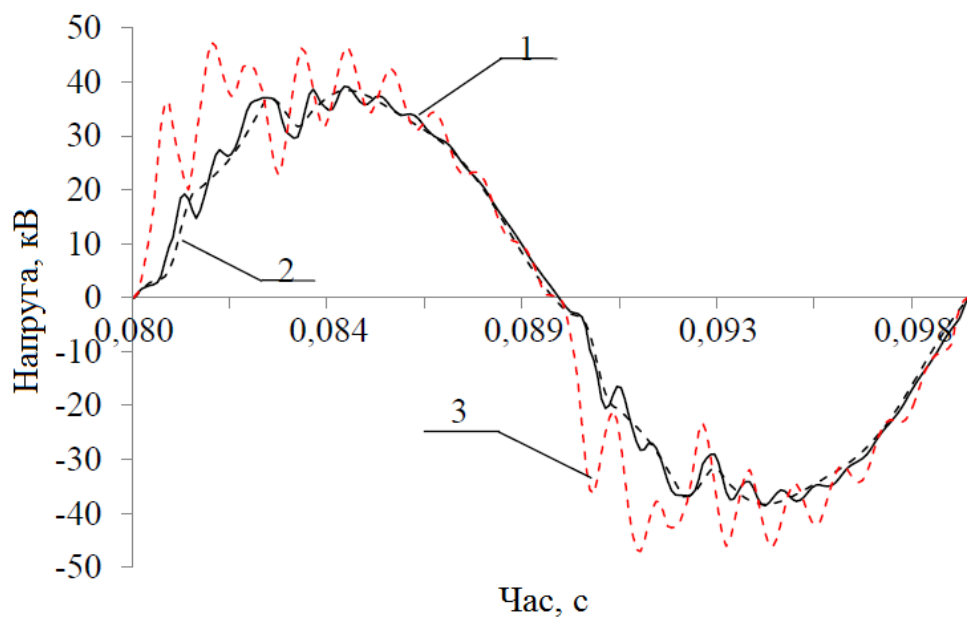


Рисунок 3.9 – Крива напруги на струмоприймачі ЕРС

У табл. 3.2 представлені значення амплітуди гармонік напруги при встановленні розглянутих варіантів фільтрокомпенсуючих пристроїв на посту секціонування тягової мережі.

Таблиця 3.2 – Амплітуди гармонік напруги для розглянутих варіантів ФКП

Гармоніка	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
Без ФКП, %	10 0	20	12	3, 6	3, 3	8, 1	8, 9	4, 7	11	9, 4	4, 5	3, 0	1, 8	1	0, 7	0, 2
ФКП сучасного виробництв а %	10 0	5, 7	3, 4	1, 5	1, 3	3, 1	2, 6	1, 0	1, 3	3, 1	4, 5	1, 6	1	1, 1	0, 5	0, 1
Варіант 1,2, %	10 0	4, 3	0, 5	1, 5	1, 3	2, 3	2, 0	0, 8	0, 5	0, 9	0, 7	0, 3	0, 2	0, 1	0, 1	0, 1

У табл. 3.3 представлені максимальні та діючі значення напруги на елементах ФКП, що розглядаються.

Таблиця 3.3 – Максимальні та діючі значення напруги на елементах компенсуючих пристроїв, кВ

	C1		C2		C3		C4		L1		L2		L3	
	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій
	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне
Вар. 1	56	31,7	8,3	4,2	40	27,7	1,5	0,6	18	9,1	8,2	4,3	4,3	1,6
Вар. 2	64	34	52	30	40	27,7	1,5	0,6	24	15,3	20	10	4,3	1,6
ФКП сучасного виробництва	50	30	6	3,2	1,5	0,92	-	-	11	4,5	5,9	3,2	5,6	2,3

У табл. 3.4 представлені максимальні та діючі значення струмів в елементах ФКП.

Таблиця 3.4 – Значення струмів в елементах ФКП, А

	C1		C2		C3		C4		L1		L2		L3	
	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій	амп	дій
	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне	літ	сне
Варіант 1	212	112	267	123	66	25	25	10	212	112	386	190	53	25
Варіант 2	165	99	67	35	65	25	25	10	165	99	67	35	53	25
ФКП сучасного виробництва	237	124	442	217	208	122	-	-	237	124	545	301	208	122

Проведене порівняння показує, що запропоновані нові ФКП мають певні техніко-економічні переваги перед відомими сучасними фільтро-компенсуючими пристроями. Вони забезпечують незалежну корекцію частотної характеристики тягової мережі в діапазонах високочастотних та низькочастотних гармонік. Так, новий варіант ФКП на рис. 3.5 дозволяє здійснювати незалежне регулювання резонансних частот вузькосмугового фільтра та частоти зрізу вузькосмугової ланки, а загальне зниження процентного вмісту вищих гармонік струму та поліпшення коефіцієнта несинусоїдності

кривої напруги сприяє покращенню якості електроенергії і підвищенню електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з нетяговими споживачами. Враховуючи значну техніко-економічну перевагу даного варіанту перед іншими, оскільки в загальному зменшується вартість ФКП, даний варіант є найбільш перспективним.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Режими роботи мереж тягового електропостачання значно відрізняються від режимів промислових систем електропостачання, тому при розробці заходів щодо покращення якості електроенергії та підвищення електромагнітної сумісності необхідно враховувати важливі особливості СТЕ.

Для тягових мереж змінного струму необхідні багатофункціональні ФКП, що забезпечують компенсацію реактивної потужності, пригнічення потужних низькочастотних гармонік, корекцію частотних характеристик СТЕ при забезпеченні електромагнітної сумісності тягової мережі з ланцюгами живлення нетягових споживачів.

В результаті аналізу було виявлено, що пригнічення низькочастотних гармонік ($n = 3,5$) доцільно здійснювати за допомогою вузькосмугових резонансних фільтрів або активних фільтрів, а для корекції частотних характеристик тягової мережі необхідні широкосмугові демпфуючі фільтри, що забезпечують узгодження опору ФКП з хвильовим опором тягової мережі в діапазоні високочастотних гармонік.

Тому, на сьогоднішній день, для забезпечення ефективної роботи системи тягового електропостачання та підвищення електромагнітної сумісності з нетяговими споживачами необхідні фільтрокомпенсуючі пристрої, що виконують наступні функції:

1. Для послаблення низькочастотних гармонік, необхідно застосовувати вузькосмугові резонансні фільтри, опір яких має мінімальне значення на частотах таких гармонік.

2. Основне завдання фільтрокомпенсуючих пристроїв у високочастотному діапазоні, для гармонік, частоти яких перевищують 500 Гц, і тягова мережа є системою з розподіленими параметрами, є демпфування резонансних явищ для запобігання посиленню вищих гармонік напруги та струму. Саме тому на рівні високочастотних гармонік опір ФКП має бути узгоджений із хвильовим опором контактної мережі. Це дасть можливість обмежити резонансні перенапруги на

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмоприймачі електрорухомого складу та знизити електромагнітний вплив тягової мережі, на пристрої нетягового електропостачання.

3. Для отримання найбільш ефективної роботи тягової мережі та нормалізації режиму напруги в системі тягового електропостачання ФКП має включати пристрої, що забезпечують динамічну компенсацію реактивної потужності в залежності від величини тягового навантаження, яке має різкозмінний характер та викликає коливання активної та реактивної потужностей.

Для одночасного виконання вище перерахованих функцій можливо використовувати структуру, яка утворена паралельним з'єднанням модулів, що реалізують заданий опір у певному діапазоні частот.

Модульна структура дозволяє формувати ФКП залежно від вимог щодо компенсації реактивної потужності, забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу із СТЕ, системами нетягового електропостачання на тяговій підстанції. У випадках, коли сумарний коефіцієнт гармонік напруги в тяговій мережі не перевищує нормативних значень, фільтр що демпфує можна виключити. Тобто перевагою такої модульної структури є те, що вона дозволяє змінювати склад ФКП з розвитком тягової підстанції.

Проведений аналіз показав, що нові методи структурного синтезу пасивних фільтрокомпенсуючих пристроїв для електроенергетичних систем з тяговим навантаженням дають можливість узагальнити відомі ФКП та отримати нові конфігурації таких пристроїв. Дані методи дозволяють варіювати конфігурації та характеристики ФКП залежно від вимог щодо компенсації реактивної потужності, забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та нетягових споживачів.

Проаналізувавши результати досліджень показано, що пропонувані нові ФКП мають певні техніко-економічні переваги перед відомими сучасними компенсуючими пристроями. Вони забезпечують незалежну корекцію частотної характеристики тягової мережі в діапазонах високочастотних та низькочастотних гармонік. Так, новий варіант ФКП дозволяє здійснювати незалежне регулювання резонансних частот вузькосмугового фільтра, а також

					02.15.EE2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частоти зрізу вузькосмугової ланки, що дозволяє значно зменшити електромагнітний вплив системи тягового електропостачання на нетягових споживачів.

Результати досліджень можуть бути використані для модернізації та впровадження багатофункціональних фільтрокомпенсуючих пристроїв на електрифікованих ділянках залізниці при розробці заходів щодо покращення якості електричної енергії та підвищенні електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та ліній нетягових споживачів.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту: навч. посібник. Д.: Вид-во, 2009. 180 с.
2. Бабаєв В. С., Блиндюк В. С., Супрун О. Д. Проектування систем електропостачання залізниць: навч. посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 291 с.
3. Енергетика тягових мереж: монографія / Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І.. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.
4. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії: підручник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 286 с.
5. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: монографія/ І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. Харків: НТУ «ХП», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.
6. Далека В. Х., Нем В. К., Скуріхін В. І. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2012. 168 с.
7. Кирик В.В. Методи організації гнучких електричних систем: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 47 с.
8. Кирик В. В. Електричні мережі та системи : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 324 с.
9. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дн-вск: Видавництво ПФ “Стандарт-Сервіс”, 2015. 344 с.
10. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: Підручник. К.: Каравела, 2015. 536 с.
11. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка, Т.1. Елементна база електронних пристроїв.: підручник. К.: Обереги, 2000. 300 с.
12. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка, Т.4. Силові пристрої: підручник. К.: Каравела, 2013. 640 с.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. К.: Либідь, 1993. 432 с.

14. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка та мікросхемотехніка: підруч. для студентів ВНЗ. К.: Каравела, 2009. 416 с.

15. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация управление, защита: учеб. для студ. вузов. К.: Каравелла, 2005. 344 с.

16. Ковернікова Л. І. Централізоване зниження рівня вищих гармонік у мережі високої напруги з розподіленими нелінійними навантаженнями за допомогою пасивних фільтрів. *Електрика*. 2010. № 9. С. 50-55 с.

17. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання / Жежеленко І. В., Шидловський А. К., Півняк Г. Г., Саенко Ю. Л. Д.: нац. гірн. ун-т, 2009. 319 с.

18. Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Сиченко В. Г. Обмеження спектру періодичних сигналів зворотних зв'язків у силових активних фільтрах для систем електропостачання контактних мереж. *Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ*. 2010. № 84. С.28-38.

19. Розанов, Ю. К., Грінберг Р.П. Гібридні фільтри для зниження несинусоїдності струму та напруги в системах електропостачання. *Електротехніка*. 2006. № 10. С. 55-60.

20. Сиченко В. Г., Зубенко В.А. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій. *Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2008. С. 63-68.

21. Сиченко В. Г., Босий Д.О. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму. *Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2009. С. 82-86.

22. Кошелєв К. С. Вибір параметрів статичного компенсатора реактивної потужності СТАТКОМ. *Електротехніка*. 2008. № 7. С. 34-38.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Сиченко В. Г., Босий Д. О. Критерії керування пристроями компенсації реактивної потужності тягових підстанцій змінного струму. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2009. № 83. С. 36-45.

24. Курінний А. Г., Лютий А. П. Оцінка несинусоїдності напруги при аналізі якості електроенергії. *Д.: Електрика*. 2005. № 8. С. 2-9.

25. Гаврилюк В. І. Огляд проблемних питань якості електроенергії на електрифікованих залізницях. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 11-20.

					02.15.ЕЕ2326.РД.2024–ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		