

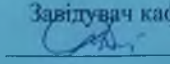
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

 /Дмитро Босий/

« 20 » 12 20 21 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах**

Theme Development of an automatic reactive power compensation device with smooth adjustment on contactless elements

Керівник дипломної роботи

доц.  Віталій Ляшук

Нормоконтролер

доц.  Віталій Перцевий

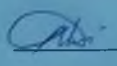
Студент групи ЕС2021

 Андрій Бумбар

Student

Bumbar Andrii

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»
«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри
 Дмитро Босій
(підпис)
« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2021 Бумбара Андрія Петровича

- 1 Тема дипломної роботи: **«Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах»**
затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 32ст
- 2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.
- 3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри пристроїв компенсації реактивної потужності.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): модернізація пристроїв компенсації реактивної потужності на тягових підстанціях постійного струму, дослідження ефективності регулювання рівня компенсації на напівпровідникових пристроях.
- 5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП	17.09	5
1.	МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ	01.10	25
2.	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ	11.11	40
3.	АВТОМАТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НА БЕЗКОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ	01.12	20
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи



Віталій Ляшук

Завдання прийняв до виконання



Андрій Бумбар

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ.....	7
ВСТУП.....	8
1. МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ.....	12
1.1 Реактивна потужність на залізниці та її способи компенсації.....	12
1.2 Пристрої компенсації в системі тяги змінного струму.....	15
1.3 Регульовані і нерегульовані установки поперечної компенсації	17
1.3.1 Нерегульовані установки поперечної компенсації	17
1.3.2 Регульовані установки поперечної компенсації.....	17
1.4 Модернізація пристроїв компенсації реактивної потужності.....	19
1.5 Технічні труднощі, які виникають під час використання конденсаторних батарей.....	24
1.6 Захист компенсуючих пристроїв.....	25
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ	27
2.1 Мотиви впровадження компенсуючих пристроїв.....	27
2.2 Розрахунок плати за перетікання реактивної енергії	28
2.3 Тягова підстанція ЕЧЕ – 25 Чубівка.....	32
2.4 Розрахунок параметрів компенсуючого пристрою.....	35
2.5 Розрахунок потужності конденсаторних батарей.....	40
2.6 Розрахунок струму гілок пристрою в колі з конденсаторними батареями	46
2.7 Вибір силових швидкодіючих тиристорів.....	48
3. АВТОМАТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НА БЕЗКОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ.....	50

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник	А. Бумбар						5	61
Керівник	В. Ляшук			20.12		УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021		
Н. контр.	В. Перцевий							

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ /Дмитро Босий/

«_____» _____ 20____ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах**

Theme **Development of an automatic reactive power compensation device with smooth adjustment on contactless elements**

Керівник дипломної роботи

доц. _____ Віталій Ляшук

Нормоконтролер

доц. _____ Віталій Перцевий

Студент групи ЕС2021

_____ Андрій Бумбар

Student

Bumbar Andrii

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»
«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри
_____ Дмитро Босий
{підпис}
« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2021 Бумбара Андрія Петровича

1 Тема дипломної роботи: **«Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах»**

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри пристроїв компенсації реактивної потужності.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: модернізація пристроїв компенсації реактивної потужності на тягових підстанціях постійного струму, дослідження ефективності регулювання рівня компенсації на напівпровідникових пристроях.

5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}: ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП	17.09	5
1.	МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ	01.10	25
2.	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ	11.11	40
3.	АВТОМАТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НА БЕЗКОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ	01.12	20
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи

Віталій Ляшук

Завдання прийняв до виконання

Андрій Бумбар

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 61 сторінок, складається з 3 розділів та містить 6 ілюстрації, 4 таблиці, 12 використаних джерел.

Мета роботи – Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах.

Також отримання інформації про ефективність роботи статичного компенсуючого пристрою реактивної енергії на ділянці зі змінною напругою 27,5 кВ з плавним регулюванням на безконтактних елементах.

Аналіз існуючих систем компенсації реактивної потужності тягового електропостачання змінного струму і вибір необхідного, сучасного устаткування.

Можливість поліпшення якості електроенергії та зменшення реактивної потужності централізованих систем електропостачання за рахунок встановлення на тягових підстанціях статичних компенсаторів.

Дослідження системи електропостачання, коли на підстанції не має реактора, а в якості компенсаторів використовуються косинусні конденсатори.

Ключові слова: РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ЗМІННИЙ СТРУМ, КОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ТЯГОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ.....	7
ВСТУП.....	8
1. МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦЯХ.....	12
1.1 Реактивна потужність на залізниці та її способи компенсації.....	12
1.2 Пристрої компенсації в системі тяги змінного струму.....	15
1.3 Регульовані і нерегульовані установки поперечної компенсації	17
1.3.1 Нерегульовані установки поперечної компенсації	17
1.3.2 Регульовані установки поперечної компенсації.....	17
1.4 Модернізація пристроїв компенсації реактивної потужності.....	19
1.5 Технічні труднощі, які виникають під час використання конденсаторних батарей.....	24
1.6 Захист компенсуючих пристроїв.....	25
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ	27
2.1 Мотиви впровадження компенсуючих пристроїв.....	27
2.2 Розрахунок плати за перетікання реактивної енергії	28
2.3 Тягова підстанція ЕЧЕ – 25 Чубівка.....	32
2.4 Розрахунок параметрів компенсуючого пристрою.....	35
2.5 Розрахунок потужності конденсаторних батарей.....	40
2.6 Розрахунок струму гілок пристрою в колі з конденсаторними батареями	46
2.7 Вибір силових швидкодіючих тиристорів.....	48
3. АВТОМАТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НА БЕЗКОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ.....	50

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробник	А. Бумбар				Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах	Літ.	Арк.	Аркушів
							5	61
Керівник	В. Ляшук					УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021		
Н. контр.	В. Перцевий							

3.1 Статичний пристрій компенсації реактивної потужності.....	50
3.2 Пристрій автоматичного управління компенсацією реактивної енергії.....	53
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

СКОРОЧЕННЯ

ТП – тягова підстанція;

ЕРС – електрорухомий склад;

КМ – контактна мережа;

ЛЕП – лінія електропередач;

КРП – компенсація реактивної потужності;

КБ – конденсаторна батарея;

КУ – регульована установка поперечної компенсації реактивної потужності;

ФКУ – фільтрокомпенсуюча установка;

УПК – регульована установка повздовжньої компенсації реактивної потужності;

СТК – система тиристорної компенсації;

Ф – фільтр;

ТРГ – тиристорна реактивна група;

ФКП – фільтрокомпенсуючий пристрій;

СТЕ – система тягового електропостачання;

СЗЕ – система зовнішнього електропостачання;

ЕЕРП – економічний еквівалент реактивної потужності;

ДПЕ – договір на поставку електроенергії;

ПЛ – повітряна лінія.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність роботи. В наш час проблема компенсації реактивної потужності особливо гостро обговорюється, як енергетиками, так і споживачами. Опубліковано безліч розпорядчих і нормативних документів, які стосуються цієї проблеми.

Проблема компенсації реактивної енергії та потужності виникла одночасно з використанням на практиці змінного і особливо трьох-фазного струму. При включенні в коло індукційної, або ємнісної складової навантаження (а це – різноманітні двигуни, промислові печі і навіть високовольтні лінії електропередач) між електроустановкою та джерелом виникає обмін потоками енергії, сумарна потужність якого рівна нулю, але при цьому він визиває додаткові втрати активної енергії, втрати напруги і знижує пропускну здатність електричних мереж. Так як уникнути подібних негативних впливів неможливо, необхідно просто звести їх до мінімуму.

Для компенсації реактивної потужності використовуються різноманітні прилади на основі статичних, або синхронних елементів. Загалом і в цілому дія всіх компенсуючих пристроїв заснована на тому, що на ділянці кола з індуктивним, або ємнісним навантаженням встановлюється додаткове джерело реактивної енергії, таким чином, описаний вище обмін потоками енергії відбувається між цим джерелом та приладом на невеликій ділянці кола, не проходячи по основним мережам і отже не викликаючи в них негативних наслідків.

Синхронна компенсація може досягатися за допомогою спеціалізованих приладів – синхронних компенсаторів, які являють собою синхронні двигуни без навантаження на валу, а також з використанням вже наявних двигунів в режимі перезбудження, або шляхом переведення генераторів в режим синхронних компенсаторів. Таким прийомом користуються промислові споживачі, які мають власні блок-станції та синхронні двигуни.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Статичні компенсатори також бувають двох видів – повздовжні та поперечні. Повздовжня компенсація використовується для високовольтних ліній електропередач. Справа в тому, що високовольтні лінії електропередач мають власні ємнісні опори та генерують реактивну потужність, основним негативним наслідком, яким є не стільки втрати електроенергії, скільки втрати напруги і отже зниження якості електропостачання. Для запобігання цих наслідків в схему послідовно вмикають компенсуючий пристрій, який зменшує реактивний опір лінії.

Але, найбільш розповсюджене використання статичних компенсаторів, які являють собою батарею конденсаторів та включаються на шини підстанції. Така компенсація використовується в різних вузлах електричних мереж і для різних класів напруги.

Отже, основний вплив на величину реактивної потужності в електричних мережах надає характер навантаження, тобто характеристики електроустановок, які приєднанні до електричних мереж енергосистеми.

Стимулювання промислових споживачів до підтримки оптимального для енергосистеми коефіцієнта реактивної потужності було введе ще в 30-х роках минулого століття, в часи інтенсивної індустріалізації. Була розроблена гнучка система знижок та надбавок до тарифу на електроенергію. Основною метою зниження величини реактивної потужності тоді було прагнення до мінімізації витрат на будівництво електричних мереж.

Тобто, знизивши величину реактивної потужності, можна було б зекономити на перерізі проводів та зменшенні потужності трансформаторів.

Система знижок та надбавок з плином часу зазнавала своїх змін, рівно як і змінювались норми на оптимальний коефіцієнт реактивної потужності.

В наш час мова вже не йде про економію при будівництві електричних мереж, як в 30-ті роки. В наше століття – століття високотехнологічних процесів та стрімко розвинених галузей, споживач вимагає від нас самого головного – надійного, безперебійного та якісного

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електропостачання. Одним з складових успіху в цьому напрямку і є контроль та управління реактивною потужністю. Саме контроль. Локального зниження і компенсації тут недостатньо.

Значення оптимізації реактивної потужності важко переоцінити. Час потребує і від енергетиків і від споживачів підвищеної дисципліни та відповідальності в рішенні цього питання для досягнення і тими, і іншими високих показників в сучасній роботі та якісного розвитку в майбутньому.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступною темою: «Експериментальні та теоретичні дослідження аварійних електричних режимів роботи тягової мережі системи електропостачання». Номер реєстрації №0110U06289, 2009 – 2011 р.»

Мета і завдання роботи. Розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах.

Об'єкт дослідження – системи тягового і не тягового електропостачання.

Предмет дослідження – розробка автоматичного пристрою компенсації реактивної потужності з плавним регулюванням на безконтактних елементах.

Методи дослідження – отримання інформації про ефективність роботи статичного компенсуючого пристрою реактивної енергії на ділянці зі змінною напругою 27,5 кВ з плавним регулюванням на безконтактних елементах.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист. Вперше пропонується використовувати статичний пристрій компенсації, який не буде включати до своєї схеми реактора. Враховуючи розміри

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реактора та тип тягової підстанції пропонується використовувати в якості компенсаторів тільки косинусні конденсатори.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень можуть бути використані при впровадженні швидкісного руху на території України, для забезпечення необхідного рівня напруги та пропускної здатності.

Результати можна використати при впровадженні пристроїв поліпшення якості електроенергії на електроенергетичних об'єктах електрифікованих залізниць.

Розроблені методики та результати експериментальних досліджень можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів з електроенергетичних спеціальностей.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на конференції «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ» 28 жовтня 2021 року.

Публікації. За результатами роботи подано до друку 1 тезу. Бумбар А. П. «АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ» [текст] / 81 Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, магістрантів та студентів «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ» (Дніпро, 28 жовтня 2021 року)

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ

1.1 Реактивна потужність на залізниці та її способи компенсації

Електрифіковані залізниці є головним споживачем реактивної енергії. Споживачами реактивної потужності на електрифікованих залізницях є: тягові підстанції (ТП), електрорухомий склад (ЕРС) та контактна мережа (КМ). Реактивна потужність ЕРС обумовлена спотворенням форми кривої первинного струму, процесом комутації струму у вентилях та намагніченням трансформатора. Реактивна потужність на ТП обумовлена намагніченням головного знижувального трансформатора, а в КМ створенням електромагнітного поля[2].

Як відомо з курсу «Теоретичних основ електротехніки» змінний струм може розглядатися у вигляді активної та реактивної складових.

Активна складова струму – це складова, яка йде на створення корисної роботи та використовується в електродвигунах і інших приймачах електроенергії. Активна складова по фазі збігається з напругою. Реактивна складова – це складова струму, яка перпендикулярна вектору напруги. Наявність цієї складової в електричних мережах обумовлюється тим, що основні види електроприймачів для своєї роботи мають потребу в змінному магнітному полі. Для створення індуктивного поля їй необхідний реактивний струм.

Реактивна потужність не пов'язана з корисною роботою електроприймачів і витрачається на створення електромагнітних полів в трансформаторах, електродвигунах та лініях електропередач (ЛЕП), при цьому ця потужність завантажує всі елементи системи, викликаючи додаткові втрати напруги, активної потужності, знижуючи потужність устаткування, тобто погіршує показники роботи системи електропостачання.

Компенсація реактивної потужності (КРП) – це вироблення, або споживання реактивної потужності за допомогою компенсуючих пристроїв.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Реактивна потужність виробляється, як на електростанціях, так і, наприклад, компенсуючими пристроями, якими можуть бути синхронні компенсатори, конденсаторні батареї (КБ) розташовані поблизу споживачів. На електрифікованих залізницях конденсаторні установки поперечної компенсації (КУ) мають ємності порівняно невеликої потужності (до 5 – 10 МВАр). Вартість виробництва реактивної потужності в генераторах електростанцій потребує у декілька разів менше витрат на її генерацію ніж в конденсаторних установках. Однак витрати на передачу реактивної потужності по мережах енергосистеми до споживачів на багато більші ніж вартість її генерації на електростанціях.

Розглянемо вплив передачі реактивної потужності на втрати напруги в ланцюзі. Додаткові втрати напруги на затискачах споживача, які викликані передачею реактивної потужності можна проаналізувати за схемою, зображеною на рисунку 1.1.

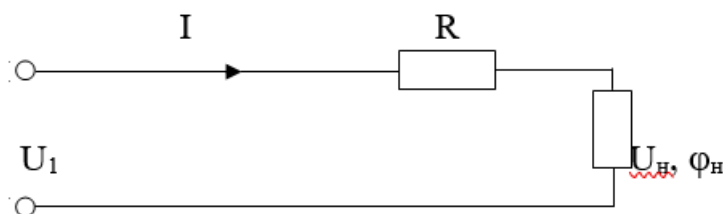


Рисунок 1.1 – Схема заміщення навантаження

Векторна діаграма падіння напруги в елементах приведеної схеми має вигляд:

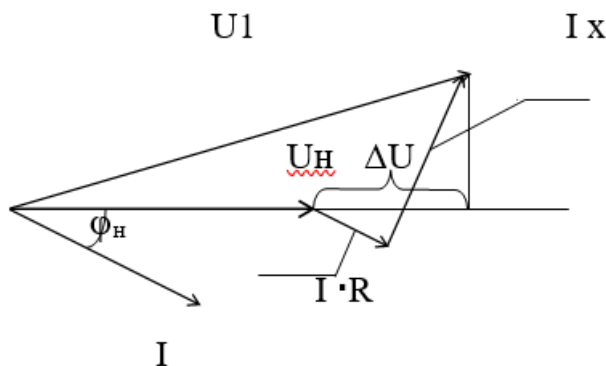


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма

З векторної діаграми виходить, що падіння напруги в ланцюзі від

джерела живлення до споживача:

$$\Delta U = I \cdot R \cos \varphi + I \cdot X \sin \varphi$$

Помноживши і розділивши праву частину виразу на U , одержимо:

$$\Delta U = \frac{U \cdot I \cdot R \cos \varphi + U \cdot I \cdot X \sin \varphi}{U}$$

Отримане значення ΔU можна представити у вигляді:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R}{U} + \frac{Q \cdot X}{U}$$

Звідси видно, що при передачі реактивної потужності збільшуються втрати напруги.

Отже КРП називається, зниження реактивної потужності, що циркулює між приймачем та джерелом струму, а отже, і зниження реактивного струму в генераторах і мережах. Заходи, необхідні для КРП проєктованих, або експлуатованих електроустановок споживачів, поділяються на три групи:

- ті, які пов'язані із застосуванням компенсуючих пристроїв;
- ті, які допускаються як виняток;
- ті, які не потребують застосування компенсуючих пристроїв.

Перші два заходи повинні обґрунтовуватись техніко-економічними розрахунками та застосовуватись при узгодженні з енергосистемою.

Остання група повинна бути спрямована на зниження споживання реактивної потужності та повинна розглядатись в першу чергу, оскільки для її здійснення, не потрібно значних капітальних вкладень.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблема КРП містить у собі цілий ряд техніко-економічних завдань:

- оптимізацію режимів роботи компенсуючих пристроїв;
- створення компенсуючих пристроїв з поліпшеними техніко-економічними показниками;
- розміщення компенсуючих пристроїв;
- організацію заходів для зниження реактивної потужності самих електроприймачів;
- вибір типів та видів компенсуючих пристроїв.

Реактивна потужність, завантажує ЛЕП та трансформатори, зменшує передачу активної потужності, збільшує втрати реактивної та активної потужності, а також викликає додаткові втрати напруги на затисках споживачів. Усе це пояснює техніко-економічна необхідність застосування конденсаторних установок поблизу споживачів, зокрема, в тяговій мережі та на ТП для компенсації реактивної потужності споживачів[2].

1.2 Пристрої компенсації в системі тяги змінного струму

В системі тяги змінного струму є доречним використання КБ, в якості компенсаторів реактивної енергії. Такі компенсуючі пристрої будуть давати вагомий ефект при їх правильному виборі та місці встановлення. На ділянках змінного струму такі компенсуючі пристрої можна підключити в будь-яку точку мережі. Встановлення компенсуючих пристроїв поблизу споживачів буде надавати найбільший ефект компенсації. Беручи до уваги те, що основним споживачем електрифікованих залізниць є ЕРС, то такий підхід буквально неможливий. Тому найкращим місцем встановлення компенсуючого пристрою буде ТП. Пропонується підключення та встановлення конденсаторів на низькій стороні понижувального трансформатора. В цьому випадку – до обмотки 27,5 кВ. В такому разі можливо буде зменшити, а можливо і повністю уникнути споживання реактивної енергії з енергосистеми.

Є ще один спосіб КРП в системі тяги змінного струму. Суть цього

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методу полягає в застосуванні замість звичайних випрямлячів на високовольтних діодах, керованих випрямляючих пристроїв. Такі компенсуючі пристрої повинні складатись з керованих випрямних елементів таких як транзистори, або тиристори. Тому ціна такого компенсуючого пристрою буде набагато більшою в порівнянні зі звичайними компенсуючими пристроями. До того ж застосування тиристорних випрямлячів вносить досить великі недоліки в систему тяги. Застосування тиристорних випрямлячів збільшує кут зсуву фаз між напругою і струмом. Тиристорні елементи відкриваються за допомогою керуючого електрода, на який подається сигнал. Саме тому їх можливо відкрити в будь-який момент часу. Стосовно закриття тиристорних елементів, то закрити їх досить важко до переходу кривої напруги через «0». Цей фактор і створює вище вказану проблему.

Застосування транзисторних випрямлячів є досить доречним, адже управління даним випрямним елементом є досить простим. Відкриття переходу емітер – колектор здійснюється при подачі керуючого сигналу на базу. Подібним чином проходить і запирання даного елементу. Тобто знімаємо з бази відповідний сигнал управління і транзистор закривається.

Основною проблемою транзисторних випрямлячів є їх робоча напруга. На даний момент по напрузі транзистори програють тиристорам, але вже є транзистори на напругу понад 5 кВ. Враховуючи переваги транзисторів, їх закордонне виробництво і високу робочу напругу маємо високу собівартість даних елементів, в порівнянні зі звичайними діодними випрямлячами. До того ж основним недоліком є те, що встановлення цих випрямлячів в системі тяги змінного струму проводиться на електровозах, і для досягнення ефекту потрібно переобладнати всі електровози на даній ділянці. Тому такий метод практично неможливий.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3 Регульовані і нерегульовані установки поперечної компенсації

1.3.1 Нерегульовані установки поперечної компенсації

Основне призначення установок поперечної ємнісної компенсації (КУ) – це КРП тягового навантаження. Особливостями компенсаційних пристроїв на електрифікованих залізницях є їх однофазне виконання з метою несиметричного включення по фазах для симетрування тягового навантаження та наявність реактора, призначенням якого є обмеження небезпечних резонансних явищ.

При великих навантаженнях з низьким коефіцієнтом потужності районного споживача компенсаційні пристрої можна встановлювати на районній обмотці. Якщо компенсаційні пристрої передбачені для компенсації тягового навантаження та реактивної потужності, то їх виконують несиметричними (тобто з різною потужністю по фазах) і можна включати як на районній, так і на тяговій обмотках трансформатора. На ряду ТП за завданням енергосистеми потужні компенсаційні пристрої (50 МВАр і більше) включають на шинах 110 кВ.

Для зниження вищих гармонійних складових установки компенсації можна розділити на три секції та налаштовувати відповідно на 3, 5 та 7-у гармоніки. Ці установки, порівнюючи зі звичайними компенсаційними пристроями, налаштованими тільки на 3-у гармоніку, при тій самій корисній потужності мають на 13 % меншу встановлену потужність. Фільтрокомпенсуючі установки (ФКУ) – це установки компенсаційних пристроїв, які виконують роль симетрування тягового навантаження та фільтрації вищих гармонік[4].

1.3.2 Регульовані установки поперечної компенсації

Ці компенсуючі пристрої виконуються одноступінчатими (коли включається і відключається вся установка), або багатоступінчатими. В деяких випадках перший ступінь в багатоступінчатому компенсуючому пристрої виконується нерегульованим. У багатоступінчатих схемах значний

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час останні ступені компенсуючих пристроїв не використовуються. Цей недолік можна усунути в ступінчастій схемі компенсуючого пристрою, що перемикається. Тут краще використовуються конденсатори та підвищується надійність їх роботи, хоча ускладнюється процес перемикання ступенів. В зв'язку з небезпечними комутаційними процесами, що виникають при підключенні чергового ступеня конденсаторів, регулювання потужності здійснюється при відключенні всієї установки, тобто в безструмову паузу включають (відключають), або перемикають ступені перемикачами, а потім включають всю установку зі зміненою потужністю основним вимикачем.

Тому доцільно регулювати потужність при обмеженому числі перемикань (не більше 1 – 2 разів на добу), наприклад: для виконання завдання енергосистеми по відключенню компенсуючих пристроїв в нічний мінімум навантаження системи, сезонного регулювання, при вимушених режимах і т. ін. При частому перемиканні потрібно застосовувати спеціальні заходи для демпфування кидків напруги та струму. Щоб обмежити кидки напруги при включенні одноступінчатого компенсуючого пристрою підключають резистор паралельно реактору через вакуумний контактор, або тиристорно-варисторний розрядник *ТР*.

У багатоступінчатих компенсуючих пристроях використовують схеми з двома КБ різної потужності (наприклад, 5 та 10 МВАр), за допомогою яких можна реалізувати навіть три ступені потужності (5, 10 та 15 МВАр). Для двоступеневого компенсуючого пристрою перший ступінь може виконуватися по схемі одноступінчатого компенсуючого пристрою, або бути нерегульованим.

Регульовані компенсуючі пристрої можуть бути включені, як на ТП так і в тяговій мережі. На ТП, під'єднуючи регульовані компенсуючі пристрої згідно з розробленими схемами, можна досягнути одночасно з КРП значної стабілізації напруги, зниження несиметрії до допустимих значень та в цілому підвищення економічності режиму роботи ТП[4].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Модернізація пристроїв компенсації реактивної потужності

В залежності від способів регулювання розглянемо наступні групи перспективних регульованих установок повздовжньої (УПК) та поперечної (КУ) компенсації реактивної потужності для тягового електропостачання:

- плавно регульована установка КУ з нерегульованою КБ та з паралельно ввімкненим трансреактором, який регулюється тиристорним блоком та фільтрами для зниження гармонік, які виникають через роботу тиристорного блоку;
- ступінчасто регульована КУ з декількома секціями КБ, які можуть перемикатись;
- УПК, які можуть перемикатись.

В наш час на ТП, мережах 35 кВ і вище використовують схеми з реактором, регульованим тиристорами (СТК), рис. 1.3,а. Змінюючи кут регулювання тиристорів від 0 до $\pi/2$, змінюється величина струму, яка протікає через реактор від номінального значення до нуля. Недоліком схеми з керованими тиристорами є наявність вищих гармонік в струмі, який споживається реактором з мережі. В схемі з реактором, керованим тиристорами, обов'язково повинні бути фільтри (Ф), налаштовані на непарні гармоніки[3, 9].

Замість реактора може застосовуватись реактор-трансформатор для зниження напруги на комутаційних тиристорах. Проект цієї схеми виконаний у Словаччині для тягового електропостачання. Відомі схеми з ввімкненням КБ через знижувальний трансформатор (автотрансформатор), які забезпечують можливості роботи СТК на зниженій напрузі.

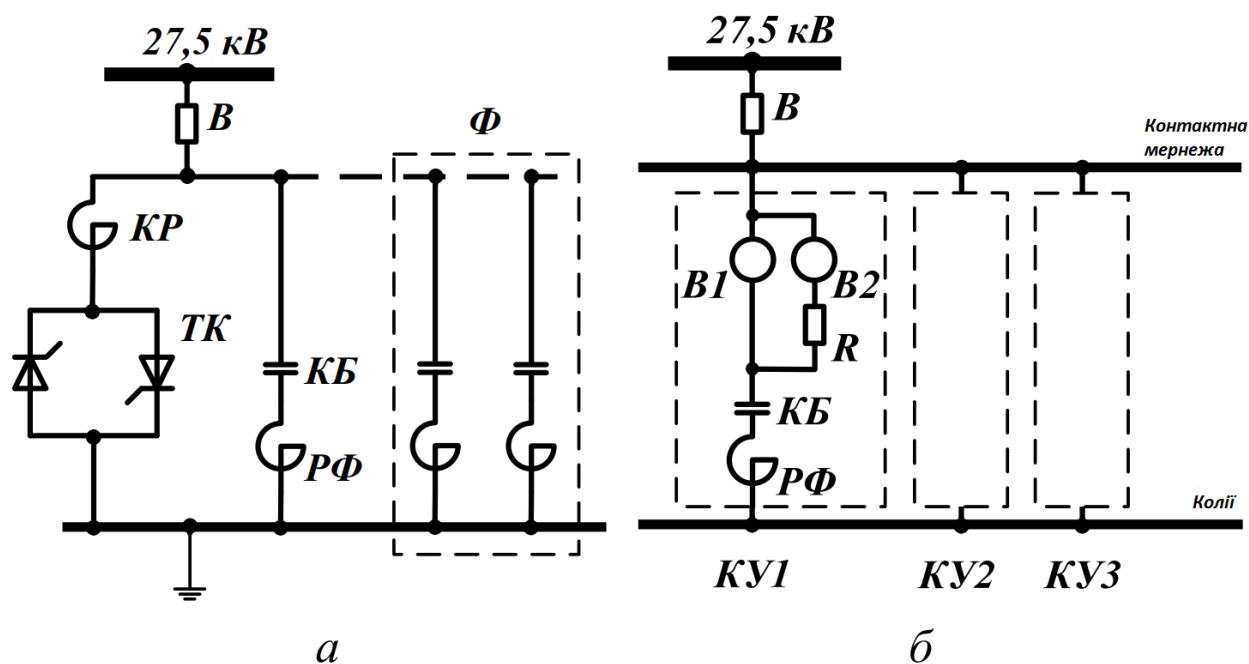
СТК потужністю 10 МВАр та напругою 25 кВ з реактивною групою ТРГ, керованою тиристорами та потужними фільтро-компенсуючими ланцюгами введені в експлуатацію на ділянці тягової мережі 25 кВ з одностороннім живленням в Chathill (Англія). В години пік втрати напруги в кінці лінії складають 8 – 9 кВ, установка СТК забезпечила зниження втрат

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

напруги на 3 кВ при максимальній потужності навантаження.

На ТП Villenoy (Франція) в 2003 р. включені три однофазні СТК на кожну фазу з тим, щоб додатково знижувати несиметрію тягового навантаження шляхом пофазного регулювання потужності СТК.

Українська залізниця також має досвід використання плавно регульованої установки КУ. Так на ТП Олександрія Одеської залізниці в 2009 р. ввели в роботу три установки КУ (виробник СКД ELECTROTECHNICA), загальною потужністю 18,4 МВАр, (рис. 1.3,а).



КР – компенсуючий реактор; Ф – фільтро-компенсуючі мережі; РФ – фільтровий реактор; ТК – тиристорний компенсатор

Рис. 1.3 Регульовані установки поперечної ємнісної компенсації з плавним регулюванням (а), та ступінчаті (б)

У фазу А та фазу В ввімкнені регульовані установки СТК з конденсаторами типу CUEFS 23 – 8.7/600/WF і реакторами компенсуючими і декомпенсуючими відповідно KTL – 182/155 KTL – 192/210 з $Q_A = 7609$ кВАр і $Q_B = 7565$ кВАр. Нерегульована установка повздовжньої ємнісної компенсації з конденсаторами КЕК1 – 1,05 – 63 – 1У1 і реактором ФРОМ – 3200/35 У1, потужністю $Q = 5699$ кВАр включається в фазу А, або В. Для забезпечення компенсації (декомпенсації) реактивної потужності і фільтрації

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

вищих гармонічних складових напруги і струму використовується загальна схема динамічної компенсації, при якій перетворювач системи СОМРАСТ здійснює регулювання величини фазного струму декомпенсуючих реакторів. В основі цієї системи – блок напівпровідникового перетворювача, який представляє собою оптотиристиори з захисними резисторно-конденсаторними елементами і блок сигналізації. До установки КУ середньодобове споживання електроенергії ТП в 2009 р. складало $S = 250 - j80$ МВА, $\tan \varphi = 0,32$. Для такого навантаження, встановлені потужності конденсаторів (18,4 МВАр) перевищують вірно розраховані за реактивною потужністю, режимом напруги, несиметрії, гармонікам в декілька разів[3]. Зокрема, потужність втрат тільки в сталі сердечників реакторів ФРОМ – 3200/35 У1 складає 10,5 кВт.

Відомий, ще один варіант регулювання КУ – ступінчаті, коли КУ складається з декількох секцій і в залежності від регульованого параметру (напруга, струм, реактивна потужність і т. д.) включається – відключається чергова секція (рис. 1.3,б, секції КУ1, КУ2, КУ3). В кожній секції включені КБ, реактор РФ і головний вимикач В1 з демпферуємим ланцюгом В2 – R. Завдання демпферуємого ланцюга знизити до допустимих значень кидки струму і напруги при включенні одиночної секції і при включенні чергової секції паралельно включеним секціям.

З секцій формуються ступені потужності КУ. Зазвичай значення потужності секцій КУ відповідає геометричній прогресії (наприклад, 2, 4, 8). Зокрема, якщо КУ складається з двох секцій 2 і 4 МВАр, то формуються наступні три ступені потужності: 2, 4 і $2+4=6$ МВАр. В якості секцій можуть бути включені секції КУ, або фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП). Типовий варіант дворезонансного ФКП в цілому відповідає пред'явленим вимогам в договорах електропостачання, однак відрізняється високим значенням відношення встановленої до корисної потужності (2,25) і високою вартістю. Заслуговує уваги схема КУ з функцією фільтрації вищих гармонік КУф

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модульного типу[10].

Необхідність модульної побудови диктується тим, що в загальному випадку ступінь необхідного зниження споживаної реактивної потужності і вищих гармонічних складових струму (напруги) відповідно до нормативів на кожній ТП різний. Тому в ФКП повинна бути можливість зміни відповідних параметрів шляхом включення (відключення) відповідних модулів. Проблема відключення КУ в наш час вирішена: вакуумні вимикачі надійно відключають ємнісні струми КУ без кидків струму і напруги. Тому основну увагу при перехідних режимах звертають на процеси включення пристроїв. Таким чином, поряд з КРП забезпечується електромагнітна сумісність систем тягового електропостачання (СТЕ) з системою зовнішнього електропостачання (СЗЕ), ЕРС, з ланцюгами автоматики і телемеханіки і пристроями провідного і радіо зв'язку.

Установка УПК для СТЕ з безперервно змінними навантаженнями – це потужне технічне рішення підвищення і стабілізації напруги на струмоприймачі ЕРС вантажонапружених ділянок залізниць. Для підвищення напруги на струмоприймачах ЕРС, а також для симетрування напруги на шинах 27,5 кВ УПК слід включити в відсмоктуючу лінію ТП (рис. 1.4). УПК повинна мати можливість перемикаць з двома секціями. При роботі одного трансформатора працює одна секція, яка визначає першу ступінь УПК за опором і потужністю. При роботі двох трансформаторів підключається друга секція, і тим самим разом з першою секцією формує другу ступінь УПК. Якщо на підстанції завжди в роботі один трансформатор, то УПК повинна утримувати одну секцію. Зі зростанням X_s СЗЕ підвищується ефективність роботи УПК. З урахування досвіду роботи УПК рекомендується встановлювати її на ТП, де опір X_s більше 0,5 Ом.

Такий метод включення підвищує рівень напруги в КМ (особливо на плечі живлення від відстаючої фази) і, що дуже важливо, симетрує напругу на шинах 27,5 кВ. В результаті знижується несиметрія напруги на лініях ДПР і

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

АБ (автоблокування)[11, 12].

Відомо, що нормативи за показниками якості електричної енергії відносяться до шин балансової приналежності (для ТП, до шин 110 (220) кВ). Несиметрія і несинусоїдальність на цих шинах залежить не тільки від тягового навантаження, але і зростає від збільшення X_S СЗЕ. Реалізація енергоефективного режиму СТЕ і можливий розкид X_S СЗЕ потребує використання пристроїв, які б могли контролювати X_S .

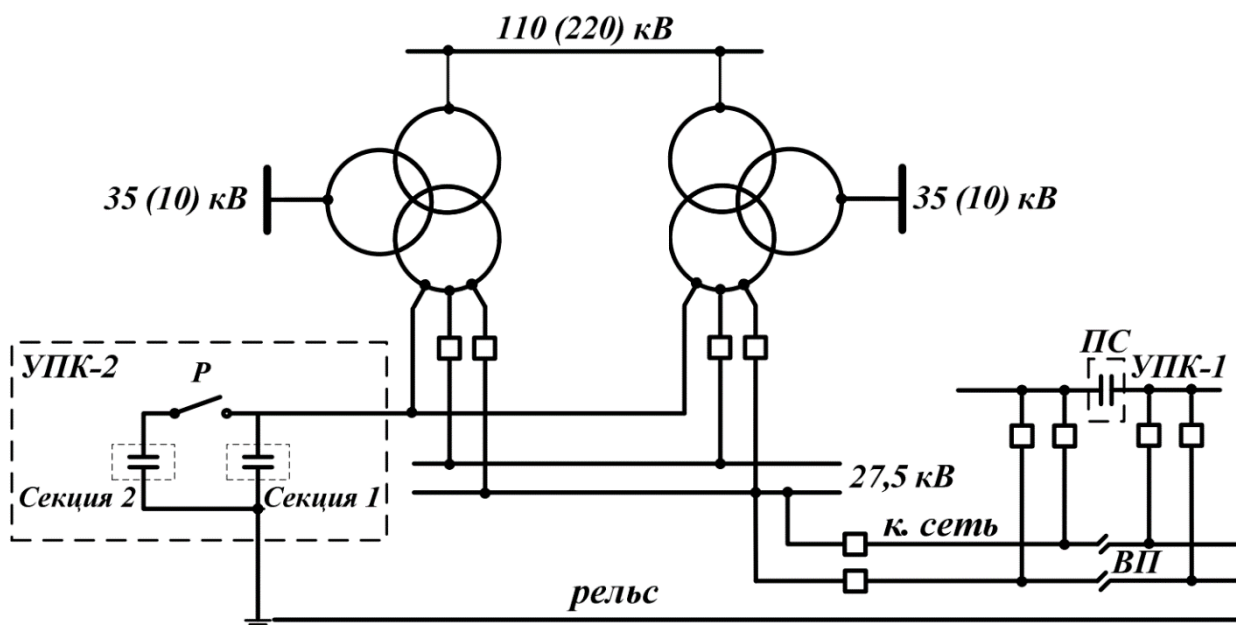


Рис. 1.4 – Повздовжня ємнісна компенсація в СТЕ

Досвід експлуатації УПК в країнах Західної Європи показує, що немає необхідності у великому ступені компенсації УПК: по перше, при великих навантаженнях включається другий трансформатор і зменшується опір підстанції; по друге, великий ступінь компенсації УПК призводить до великих зрівняльних струмів в тяговій мережі і в перевантаженні трансформаторів ТП. Тому слід за можливості знижувати ступінь компенсації до допустимого значення $K=0,7$.

1.5 Технічні труднощі, які виникають під час використання конденсаторних батарей

Як відомо, найбільш економічним засобом КРП на електрифікованих залізницях є КБ. Це можна пояснити їхніми перевагами над іншими засобами КРП, а саме: можливістю застосування, як на низькій, так і на високій напрузі; малі втрати активної потужності (0,0025 - 0,005 кВт/кВАр); найменша питома вартість (за 1 кВАр) порівнюючи з іншими компенсуючими пристроями; простота експлуатації (через відсутність тертьових та обертових частин); простота виробництва монтажу (відсутність фундаменту та мала маса).

В мережах з підвищеним вмістом вищих гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями, застосування звичайних компенсуючих пристроїв, розрахованих на синусоїдальні напруги та струми, пов'язано з технічними труднощами.

За необхідності компенсації навантажень з швидкозмінною реактивною потужністю застосовується регулювання потужності КБ шляхом підключення, або відключення її секцій за допомогою механічних вимикачів виявляється складним, а частіше й неможливим у зв'язку з високою вартістю, малою швидкодією та низькою механічною міцністю вимикачів, а також ступінчастим характером регулювання потужності батареї. Можливо, крім того, виникнення ударних комутаційних струмів, що залежать від моменту підключення КБ до мережі живлення, а також несприятливий вплив на конденсатори струмових перевантажень при частоті вищих гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями.

Дослідження процесу роботи конденсаторних установок при наявності вищих гармонік в мережі живлення, особливо при роботі вентильних перетворювачів, представляє важливе практичне значення для визначення можливості застосування КБ в системах електропостачання промислових підприємств[2].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6 Захист компенсуючих пристроїв

Згідно ПУЄ необхідні наступні види захисту для установок паралельної компенсації, що складаються з конденсаторів з вбудованими запобіжниками секцій:

- захист, у разі перевантаження конденсаторів вищими гармоніками відключає установку з витримкою часу при діючому значенні струму, який перевищує 130 % номінального;
- захист від струмів короткого замикання, діючий на відключення без витримки часу;
- захист, що відключає установку при підвищенні напруги на ній понад допустимої та працює з витримкою часу 3 – 5 хв.

Для захисту від струмів короткого замикання на установках паралельної компенсації застосовують два види захисту – максимальну струмову та профільну диференціальну. Захисти діють на відключення компенсуючих пристроїв без витримки часу.

Максимальний струмовий захист повинен бути відстроєний від робочих струмів компенсуючого пристрою, струму розряду та струму включення компенсуючого пристрою в мережу. Робочий струм компенсуючого пристрою визначається технічними вимогами конденсаторів, які допускають тривалу роботу при діючому значенні струму не більш 130 % від номінального.

Для захисту застосовують електромагнітні струмові реле. Можливо також використовувати індукційні реле з обмеженою залежною витримкою часу. Дані реле забезпечують захист не тільки від струмів короткого замикання, але і від перевантажень.

Захист по максимальній напрузі виконується залежно від наявності регулювання напруги шин, до яких підключена компенсаційна установка. Якщо використовується автоматичне регулювання, то захист не застосовується.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За відсутності регулювання захист відключає компенсаційну установку з витримкою часу 3...5 хв. при підвищенні напруги на конденсаторах вище 110 % від номінальної.

Захист від комутаційних перенапруг зменшує дію комутаційних перенапружень на установках компенсації та устаткуванні пристроїв електропостачання. Це виконується наступними способами: зменшенням перенапружень за допомогою розрядників, або обмежувачів перенапруг чи за допомогою включення резистора в ланцюг установки компенсації в перехідному режимі; усуненням причин появи великих перенапружень.

Комутаційні напруги зменшуються за наявності резистора з великим активним опором в ланцюзі установки компенсації. Постійне включення резистора недоцільне, оскільки викликає великі втрати енергії. Тому його підключають тільки у момент включення та відключення компенсуючого пристрою[4].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОМПЕНСАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ

2.1 Мотиви впровадження компенсуючих пристроїв

Критерієм вибору оптимальної потужності пристрою поперечної емнісної КРП на тягу є мінімум щорічних приведених витрат, однією з основних складових яких є оплата за перетікання реактивної потужності. Ця оплата виробляється відповідно до нині діючої методики, орієнтованої на ринкові відносини постачальників електроенергії з їх споживачами при державному економічному регулюванні цих відносин в напрямках енергозбереження, підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання споживачів. Для Українських залізниць зменшення втрат активної електроенергії, обумовлених перетіканнями реактивних потужностей, є реальною експлуатаційною технологією енергозбереження в ЛЕП. Ефективне економічне регулювання реактивних перетікань необхідне для забезпечення нормальних рівнів напруги та для зменшення аварійності основного електроустаткування в енергосистемі та у споживачів електроенергії.

Використані нові системотехнічні, інженерні та інформаційні рішення, які спираються на досягнутий в електроенергетиці України рівень використання сучасної комп'ютерної техніки. При цьому основний об'єм процесів збереження інформації, економічних та інженерних розрахунків покладено на пакети та бази даних програм, що увійшли до розробленого в 1992-95 рр. комп'ютерного комплексу економічного управління КРП в електричних системах споживачів.

Економічні стимули для енергозбереження та регулювання реактивних перетікань створюються методикою за допомогою коефіцієнта стимулювання капітальних витрат на засоби КРП в ЛЕП споживачів, а також за допомогою коефіцієнта обліку збитку, які виникають в години нічних провалів добових графіків електричних навантажень, під час генерації

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реактивної електроенергії з електричних мереж споживачів в мережі енергосистеми.

Дана методика забезпечує:

- економічне стимулювання споживачів до зменшення перетікань реактивної потужності;
- економічну компенсацію втрат активної електроенергії розподільних та магістральних мереж енергосистеми, обумовлених перетіканнями реактивної потужності в мережах та з мереж споживачів;
- удосконалення режимної роботи в електричних мережах, розширення сфери використання комп'ютерної техніки, впорядкування організаційних відносин енергозабезпечуючих організацій зі споживачами електроенергії;
- регулювання реактивних перетікань зі сторони споживачів, необхідне для збереження основного устаткування та для забезпечення нормальних рівнів напруги.

Стимулювання споживачів до розвитку пристроїв КРП в їх електричних мережах є найважливішим оптимізуючим чинником, під впливом якого капітальні вкладення в пристрої КРП та витрати на їх експлуатацію здійснюватимуться в електричних системах, де ці вкладення та витрати даватимуть найбільший техніко-економічний ефект[8].

2.2 Розрахунок плати за перетікання реактивної енергії

Розрахунки споживання реактивної енергії з мережі енергозабезпечуючої організації та генерації реактивної енергії в її мережі здійснюються:

- зі всіма непромисловими споживачами, що мають сумарне середньомісячне споживання активної електроенергії по всіх точках обліку більше 30 тис. кВт-годину.
- зі всіма залізничним та міським електрифікованим транспортом (електротягою), а також перепродавцями електроенергії;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зі всіма промисловими та прирівняними до них споживачами.

Контролюється фактичне споживання реактивної електроенергії традиційними лічильниками реактивної енергії, які мають стопори зворотного ходу.

При виникненні зустрічних перетікань реактивної потужності з мережі споживача в мережу енергопостачаючої організації (генерація реактивної енергії), на межі розділу перерахованих мереж необхідно мати окремий облік генерації та споживання реактивної електроенергії[2].

Оплата за генерацію та споживання реактивної електроенергії визначається трьома складовими величинами:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3$$

де, Π_1 – основна оплата за генерацію та споживання реактивної електроенергії;

Π_2 – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача пристроями КРП;

Π_3 – зниження оплати за генерацію та споживання реактивної електроенергії в випадку участі споживача в оптимальному добовому регулюванні режимів мережі енергозабезпечуючої організації в розрахунковий період.

Основна оплата за згенеровану та спожиту реактивну електроенергію для споживачів визначається формулою:

$$\Pi_1 = \sum (WQ_{\Pi} + K \cdot WQ_{\Gamma}) \cdot D \cdot T$$

де, WQ_{Π} – споживання реактивної енергії в точці обліку за розрахунковий період, кВАр·годину;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

WQ_{Γ} – генерація реактивної енергії в мережу енергозабезпечуючої організації в точці обліку за розрахунковий період, кВАр·годину;

$K = 3$ – нормальний коефіцієнт обліку збитку енергозабезпечуючої організації від генерації реактивної електроенергії з мережі споживача;

D – економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП), що характеризує частку впливу реактивного перетікання в точці обліку на техніко-економічні показники в розрахунковому режимі, кВт/кВАр;

T – середня вартість активної електроенергії за розрахунковий період, грн./кВт годину.

Розрахунок ЕЕРП здійснюється енергозабезпечуючою організацією один раз в два роки. Значення ЕЕРП, базового коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень в пристроях КРП та коефіцієнта збитку від генерації реактивної потужності з мережі споживача вказується в Договорі на поставку електроенергії (ДПЕ).

Надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача пристроями КРП визначається формулою:

$$П_2 = П_1 \cdot C_{\text{БАЗ}} \cdot (K_{\varphi} - 1)$$

де, $П_1$ – сумарна основна платня;

$C_{\text{БАЗ}} = 1,3$ – нормативне базове значення коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень в пристрої КРП в електричних мережах споживача;

K_{φ} – коефіцієнт, що вибирається залежно від фактичного коефіцієнта потужності споживача $\tan \varphi$ в середньому за розрахунковий період.

Для промислових та прирівняних до них споживачів, міського та залізничного електротранспорту – $\cos \varphi = 0,97$ ($\tan \varphi = 0,25$).

Для не промислових споживачів – $\cos \varphi = 0,8$ ($\tan \varphi = 0,75$).

Надбавка починає діяти, коли фактичний коефіцієнт потужності менше наведеного значення $\cos \varphi$.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фактичний коефіцієнт потужності споживача в середньому за розрахунковий період визначається за формулою:

$$\tan \varphi = WQ_{\Pi} / WP$$

де, WP – споживання активної електроенергії за розрахунковий період кВт·годину;

WQ_{Π} – споживання реактивної енергії за той же період, кВАр·годину.

Зниження оплати за генерацію та споживання реактивної електроенергії можливе за умови достатнього оснащення електричної мережі споживача пристроями КРП, за наявності зонного обліку згенерованої та спожитої електроенергії, виконанні споживачем обумовленого енергозабезпечуючою організацією добового графіка генерації і споживання електроенергії та наявності його оперативного контролю. Графіки генерації та споживання указуються в ДПЕ.

Споживач має право контролювати всі розрахунки, включаючи ЕЕРП. Енергозабезпечуюча організація зобов'язана за запитом споживача надати йому можливість ознайомитись з розрахунками.

При обігу основного споживача енергозабезпечуюча організація може надати розрахункову та методичну допомогу в його відносинах зі споживачами.

У випадку не надання даних про перетікання реактивної електроенергії в терміни, визначені в ДПЕ, енергозабезпечуюча організація здійснює розрахунок так само, як і за відсутності приладів обліку згідно цієї методики.

При короткочасному порушенні обліку не з вини споживача розрахунок за перетікання реактивної електроенергії здійснюється за середньодобовими показниками за попередній розрахунковий період.

Інтервал розрахунку за середньодобовими показниками не повинен

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевищувати один місяць, впродовж якого облік повинен бути відновлений. У разі, коли з об'єктивних причин облік не може бути відновлений в призначений термін, порядок подальших розрахунків визначається двосторонньою домовленістю між споживачем та енергозабезпечуючою організацією.

Розбіжності, що можуть виникнути між енергозабезпечуючою організацією та споживачем з питань методики розрахунку перетікання реактивної електроенергії, розглядаються Держенергонаглядом України. При незгоді сторін питання розв'язуються НКРЕ, висновок якої є остаточним[5].

2.3 Тягова підстанція ЕЧЕ – 25 Чубівка

ТП ЕЧЕ – 25 була приведена в експлуатацію в с. Бочманівка в 1989 р. Підстанція отримує живлення від повітряної лінії (ПЛ) 110 кВ. Дана підстанція є транзитною.

Для КРП на даній ТП використовують ФКУ, яка введена в роботу з метою доведення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ до нормованої величини 0,95 – 0,97 шляхом КРП тягового навантаження і фільтрації гармонік живлячої мережі, покращення параметрів електроенергії на ТП. ФКУ під'єднана до шин ВРП – 27,5 кВ, фаза «В», за схемою установки компенсації поперечного типу (паралельно тяговому навантаженню) і спеціального регулятора, який забезпечує управління в автоматичному режимі величиною додаткового декомпенсуючого реактора.

Принципова схема ФКУ складається з двох кіл – коло компенсації і коло декомпенсації.

Коло компенсації підключено до фази «В» і складається з:

- комутаційного обладнання (два вакуумних вимикача ВР – 27,5НС; два роз'єднувача з заземлюючими ножами);
- реакторного обладнання – фільтровий дросель ФТЛП – 148/240;
- конденсаторного обладнання – конденсатори типу CUEFS – 23 в кількості 16 штук, монтажне розміщення вертикальне; корпус з нержавіючої

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

сталі; система діелектрика – металізована напівпровідникова плівка; імпрегнант (діелектрик) – синтетична рідина, біологічно утилізована, не містить токсичні речовини; розрядні резистори вбудовані (на 75 В за 3 хвилини) (рис. А.1, Б.1);

- двох трансформаторів струму ТФЗМ – 35/600 і ТСК – 600/5;
- двох трансформаторів напруги ЗНОМ – 35, обмежувача перенапруг ОПН – 27,5 кВ.

Коло декомпенсації підключене до КРУП – 10 кВ і складається з:

- реакторного обладнання – декомпенсуючий дросель КТЛ – 194/213;
- автоматичного регулятора СОМРАСТ СК15 – система напівпровідникового перетворювача, що охолоджується повітрям. В основі системи – блок напівпровідникового перетворювача, який складається з оптотиристорів з захисними резисторно-компенсаторними елементами і блоку сигналізації. Робоче середовище

– приміщення, захищені від атмосферних впливів з регулюванням температури. Шафа перетворювача СОМРАСТ є звареною, самонесучою рамою. Стеля, нижня основа та бічні стінки знімні. Шафа розділена на верхню і нижню частини. У кожній частині є свої двері, ззаду двері спільні. В верхній частині розміщується складовий блок з оптотиристорами і допоміжними колами (рис. В.1). В нижній частині розміщується монтажна панель з регулятором, допоміжні елементи, реле і клемна коробка (рис. Г.1). В задній частині комплексу СОМРАСТ СК15 розміщені з'єднуючі контакти, датчики струму і датчик повітряних потоків. На задніх дверях шафи

розміщений фільтр для забору повітря, що охолоджує, до перетворювача. Повітря до обладнання подається через теплові труби в блоці перетворювача. В період експлуатації обладнання, Ф можна замінити. На верхніх передніх дверях шафи СОМРАСТ СК15 розміщена буквено-числова панель керування (рис Г.1, Д.1).

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фото вище вказаного обладнання ЕЧЕ – 25 вказано на рис. Е.1, Є.1, Ж.1, З.1.

На даний момент автоматичний регулятор СОМРАСТ СК15 на ЕЧЕ – 25 не працює в зв'язку з виходом з ладу певної кількості оптотиристорів, тому процес КРП не регульований. А також для КРП використовується лише дві секції конденсаторів, так як в двох інших вийшли з ладу декілька КБ.

Тому для компенсації реактивної енергії на даній ділянці пропоную використовувати систему КБ з автоматичним пристроєм регулювання необхідної потужності. Така система конденсаторів дозволить модифікувати таку підстанцію без значних змін її конструкції. Як відомо для компенсації використовую зв'язані ланцюги реактора і конденсаторів. Але враховуючи тип підстанції та розміри реактора, я пропоную обійтися без нього. Для цього, в силовій схемі керування конденсаторами пропоную використовувати безконтактні статичні елементи керування основані на новітніх технологіях. Це IGBT елементи. Їхніми перевагами є: висока швидкодія при достатньо високих потужностях і робочих напругах. Саме для даного рішення, пропоную використовувати статичні високовольтні тиристори. Можна також використовувати і IGBT транзистори, але їх ціна вища від тиристорів. Використання таких тиристорів дозволить обійтися без реакторів, так як вони мають захист від перенапруг. Також цей фактор дозволяє підключати їх послідовно без додаткових елементів, так званих R – С Ф для рівномірного розподілення напруги по тиристорах. Цей ряд тиристорів може працювати з досить великими перевантаженнями. Для їх нормальної роботи потрібні радіатори[7]. Щодо пристроїв керування пропоную вибрати пристрій марки DCRK. А саме виберемо пристрій DCRK 5, де 5 означає кількість КБ, які можна підключити до приладу. Перевагою даного приладу є його ціна. Використовувати будемо тільки 3 ступені приладу. Виробник приладу свідчить про його високу швидкодію, хоча вихідні елементи керування це електромеханічні реле. Для більшої швидкодії їх можна замінити

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транзисторами, але враховуючи те, що закриття силових тиристорів до переходу кривої напруги через «0» не відбудеться то цього можна і не робити. Так як ми використовуємо тільки 3 ступені приладу, то ще одну ступень можна використати для захисту. Прилад дозволяє її налаштувати так, що в разі виявлення регулятором ненормальної ситуації в систем він може відключити систему КБ. Цим самим він захистить її від пошкодження. Використовуючи всього три ступені приладу ми можемо організувати сім режимів компенсації реактивної потужності.

2.4 Розрахунок параметрів компенсуючого пристрою

Число послідовно сполучених конденсаторів визначається їх здатністю навантаження по нарузі. Кількість паралельно сполучених конденсаторів визначається прийнятим ступенем компенсації, тобто номінальною потужністю компенсуючого пристрою.

Число конденсаторів M , що сполучаються послідовно, можна визначити за виразом:

$$M = 1,03 \cdot U_{\text{ш}} \cdot a \cdot b / u_{\text{н}}$$

де 1,03 – коефіцієнт, що враховує розкид ємності рядів конденсаторів; при відсутності підбору конденсаторів в ряду слід брати коефіцієнт 1,05;

$U_{\text{ш}}$ – номінальна напруга на шинах, до яких підключено компенсуючий пристрій, кВ;

a – коефіцієнт збільшення напруги на КБ через наявність реактора;

b – коефіцієнт, що враховує додатковий нагрів конденсаторів вищими гармоніками та сонячною радіацією;

$u_{\text{н}}$ – номінальна напруга одного конденсатора, кВ.

Напруга на кожному конденсаторі рівна добутку його протікаючого струму та опору. Тому струм буде залежити від опору всієї установки, унаслідок чого ряди паралельно сполучених конденсаторів, що мають

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

великий опір (меншу ємність), перевантажуватимуться, а при меншому опорі – недовантажуватимуться. Оскільки конденсатори мають розкид по ємності, то для зменшення перевантаження конденсаторів при експлуатації та монтажі підбирають їх у рядах так, щоб ємності окремих рядів не відрізнялися від середньої ємності ряду у бік зниження більш ніж на 2 – 3 %, і це відхилення враховують при визначенні загального числа послідовних конденсаторів. При використанні батарей, що складається з одного кола послідовно сполучених конденсаторів, підбір конденсаторів викликає складності, тому слід уникати такої конструкції компенсуючого пристрою[6].

Коефіцієнт a залежить від опору реактора, вибір якого визначається умовами посилення вищих гармонік.

Напругу на батареї конденсаторів установки компенсації за наявності реактора можна визначати за формулою:

$$U_C = I_{KY} \cdot X_C = \frac{U_{III} \cdot X_C}{X_C - X_P} = U_{III} \cdot \frac{1}{1 - X_P/X_C}$$

Можна зробити висновок, що напруга на конденсаторах буде вищою ніж напруга шин на величину, яка визначається співвідношенням опорів конденсаторів та реактора. Дане збільшення і враховує коефіцієнт a :

$$a = \frac{1}{1 - X_{P1}/X_{C1}}$$

Якщо передбачається, що компенсуючий пристрій здійснюватиме фільтрацію гармонік, то необхідно буде точно налаштувати установку на певну гармоніку. В такому випадку для фільтрації 3-ї гармоніки $a_3 = 1,125$, а для 5-ї $a_5 = 1,04$.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

В багатьох випадках прагнуть зменшити вміст вищих гармонік в струмі компенсуючого пристрою, для чого збільшують опір реактора. Тоді $a_3 = 1,14$; $a_5 = 1,05$.

При навантаженні конденсатора номінальним струмом частотою 50 Гц та при температурі навколишнього середовища, обумовленої стандартом, нагрів його діелектрика не перевищує допустимих значень. Але конденсатори компенсуючого пристрою можуть навантажуватись не тільки струмом основної частоти, але і вищими гармоніками. Крім того, на компенсуючий пристрій відкритої установки впливає сонячна радіація, яка додатково нагріває корпуси конденсаторів, а отже, і діелектрик.

Щоб уникнути зменшення терміну служби діелектрика конденсатора, його нагрів не повинен перевищувати допустимих значень у всіх режимах роботи. Тому за наявності додаткових джерел нагріву необхідно буде зменшувати навантаження конденсатора струмом основної частоти. Це можна зробити, завдяки збільшенню числа послідовно сполучених конденсаторів, тобто збільшенням реактивного опору установки компенсації.

Коефіцієнт b визначає ступінь такого збільшення для конденсаторів з синтетичним заповненням:

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^5 \frac{P_n^2}{n}}$$

де 1,04 – коефіцієнт, що враховує нагрів конденсаторів сонячним промінням в компенсуючому пристрої відкритої установки; для компенсуючого пристрою закритої установки, або якщо конденсатори захищені від сонця екранами, тоді цей коефіцієнт можна прийняти рівним одиниці;

$P_n = I_{КУn}/I_{КУ1}$ – відносне значення n -ї гармоніки в компенсуючому пристрої.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вищі гармоніки в компенсуючому пристрої залежать від багатьох причин: тягового навантаження, конструкції установки, опору СЗЕ, типу ЕРС, наявності інших джерел вищих гармонік в системі і т.д. Тому для кожної установки компенсації коефіцієнт b буде різним. Для випадків, що найчастіше зустрічаються, коефіцієнт b можна визначити за формулою:

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{1 + 14 \cdot 10^{-6} \cdot (A_{\text{сим}}/Q_H)^2}$$

Щоб можна було користуватись цією формулою необхідно знати середньодобову витрату електричної енергії ТП в місяці інтенсивного вантажопотоку $A_{\text{сим}}$, або міжпідстанційні зони, де розташовується компенсуючий пристрій на ділянках змінного струму та номінальну потужність установки компенсації Q_H .

Число паралельних конденсаторів компенсуючого пристрою визначається необхідною реактивною потужністю установки на фазу Q_H та типом використовуваних конденсаторів:

$$N \approx Q_H / \left(\frac{a \cdot U_{\text{III}}^2 \cdot 10^6}{x_C \cdot M} \right)$$

де x_C – опір ємності одного конденсатора, Ом.

Очевидно, що величина N повинна бути цілим числом.

Індуктивність ЛЕП і трансформаторів, а також ємність установки паралельної компенсації утворюють коливальний контур з власною частотою $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Для струму з частотою ω_0 індуктивний опір контуру компенсується опором ємності, внаслідок чого струм в контурі обмежується тільки активним опором трансформаторів, дротів та конденсаторів і може досягати великих значень.

Частота ω_0 визначається параметрами СЗЕ та установок компенсації. У реальних системах вона лежить в діапазоні від $2\omega_1$ до $25\omega_1$ (тут ω_1 – частота основної гармоніки) і може змінюватись при зміні схеми живлення.

В системі з джерелом струмів вищих гармонік можуть виникнути великі струми з частотою ω_0 . Такими джерелами струмів вищих гармонік є перетворювачі ТП постійного струму та електровозів змінного струму. В енергосистемі можуть бути також і інші джерела вищих гармонік, такі як перетворювачі електролізних заводів та металургійних комбінатів, могутні трансформатори і т.д. Перетворювачі системи тягового електропостачання споживають з мережі несинусоїдальний струм. Струм цей можна представити як суму синусоїдальних складових, так званих гармонік. Схеми випрямлення на ТП постійного струму та ЕРС змінного струму симетричні для обох напівперіодів, тому перетворювачі є джерелами тільки непарних гармонік, кратних основній частоті 50 Гц. Порядковий номер гармоніки первинного струму перетворювачів буде підкорятися закону:

$$n = km \pm 1$$

де m – число фаз перетворювача;

k – будь-яке ціле позитивне число (1, 2, 3, ...).

В ЕРС змінного струму експлуатуються двофазні перетворювачі, тому відповідно до приведенного вище виразу вони є джерелом всіх непарних гармонік ($n = 3, 5, 7, 9 \dots$).

Щоб розладнати резонанс на всіх гармоніках – 3, 5, 7-й і т.д. необхідно для всього цього ряду порушити умову резонансу. Для цього потрібно буде послідовно з КБ ввімкнути реактор. Підібравши індуктивність реактора так, щоб його індуктивний опір 3-ї гармоніки був рівним опору ємності батареї, тобто $x_{r3} = x_{c3}$. Тепер можна бути упевненим, що індуктивний опір всього контура для цієї частоти перевищуватиме ємність,

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

тобто резонанс стане неможливим.

При нормальній частоті $f_1 = 50$ Гц опір реактора $x_{p1} = x_{p3}/3$, а опір конденсаторної батареї $x_{c1} = 3x_{c3}$, тому загальний опір поперечної компенсації матиме ємнісний характер. При цьому опір реактора 1-ї гармоніки можна визначити за формулою:

$$x_{p1} = \frac{x_{c1}}{9}$$

Розрахунок параметрів компенсуючих пристроїв виконується для різних значень ступенів компенсації з тим, щоб в результаті порівняння розглянутих варіантів можна було вибрати оптимальний.

Число послідовно сполучених рядів конденсаторів буде однаковим для всіх варіантів.

Кількість же паралельно сполучених конденсаторів в ряду буде залежати від прийнятого ступеня компенсації.

Базовим будемо приймати той варіант, в якому корисна реактивна потужність компенсуючого пристрою буде дорівнювати середньорічному значенню реактивної потужності, споживаної на тягу[6].

2.5 Розрахунок потужності конденсаторних батарей

Річна витрата реактивної електроенергії на тягу підстанції $W_{p\Sigma}$ буде складати:

$$W_{p\Sigma} = 9233950 \text{ кВАр}\cdot\text{год}$$

Виходячи з вище вказаної величини можемо визначити середньорічну реактивну потужність:

$$Q_H = \frac{W_{p\Sigma}}{T} = \frac{9233950}{365 \cdot 24} = 1054,1 \text{ кВАр}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де T – кількість годин в році.

Розрахувавши реактивну потужність, споживану тягою, можемо визначити реактивну потужність першої секції, тобто одного ступеню пристрою:

$$Q_{\text{НС}} = \frac{Q_{\text{Н}}}{7} = \frac{1054,1}{7} = 150,6 \text{ кВАр}$$

де 7 – кількість ступенів компенсації.

Так як напруга на даних конденсаторах $u_{\text{Н}} = 20 \text{ кВ}$, то кількість з'єднаних послідовно конденсаторів можна визначити за формулою:

$$M = 1,03 \cdot U_{\text{Ш}} \cdot a \cdot b / u_{\text{Н}}$$

де $U_{\text{Ш}} = 27,5 \text{ кВ}$;

a – коефіцієнт збільшення напруги на КБ, через наявність реактора, для фільтру 3-ї гармоніки $a_3 = 1,125$;

b – коефіцієнт, який враховує додатковий нагрів конденсаторів сонячною радіацією та вищими гармоніками.

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{1 + 14 \cdot 10^{-6} \cdot (A_{\text{СИМ}}/Q_{\text{Н}})^2}$$

де $A_{\text{СИМ}}$ – середньодобова витрата електричної енергії ТП в місяці інтенсивного вантажопотоку, $A_{\text{СИМ}} = 24874 \text{ кВАр}$;

$Q_{\text{Н}}$ – номінальна потужність установки компенсації, $Q_{\text{Н}} = 1100 \text{ кВАр}$.

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{1 + 14 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{24874}{1100}\right)^2} = 1,04$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M = \frac{1,03 \cdot 27,5 \cdot 1,125 \cdot 1,04}{20} = 1,65$$

Так як конденсаторів не може бути дробове число, тому округляємо отримане значення М до більшого, М=2.

Число паралельних конденсаторів компенсуючого пристрою визначається необхідною реактивною потужністю установки на фазу Q_H , типом вживаних конденсаторів і номером гілки:

$$N \approx Q_H / \left(\frac{a \cdot U_{III}^2 \cdot 10^6}{x_C \cdot M} \right)$$

де x_C – опір ємності одного конденсатора, Ом.

Так як в даному пристрої КРП передбачено чотири гілки конденсаторів, то сума реактивної потужності на фазу буде складатись з суми усіх реактивних гілок конденсаторів.

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

де Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – потужність кожної гілки конденсаторів.

Знайдемо необхідну реактивну потужність першої гілки:

$$Q_{1\text{розр}} = Q_{HC}$$

$$Q_{1\text{розр}} = 150,6 \text{ кВАр}$$

Для підбору конденсаторів скористаємось таблицею 2.1.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Номінальні параметри косинусних конденсаторів

Умовне позначення	Найменування	Робоча напруга u_H , кВ	Номінальна потужність Q, кВАр
q_1	Конденсатор косинусний	20	300
q_2	Конденсатор косинусний	20	600
q_3	Конденсатор косинусний	20	600

Для надійної роботи установки необхідно щоб номінальна потужність суми вибраних конденсаторів була якомога ближчою до розрахункової, для цього скористаємося конденсаторами різної ємності. Потужність вибраних параметрів конденсаторів не повинна перевищувати 10 % від розрахункових значень.

Як відомо, при послідовному підключенні потужність конденсаторів зменшується

$$Q = \frac{Q_H}{M}$$

тому кількість під'єднаних конденсаторів в даному випадку збільшиться втричі порівняно з потужністю всієї гілки.

Розрахуємо потужність першої гілки з урахуванням типу конденсаторів:

$$Q_1 = \frac{q_1}{2}$$

$$Q_1 = \frac{300}{2} = 150 \text{ кВАр}$$

Виконаємо порівняння:

$$k = \left| \frac{Q_1 - Q_{2\text{розр}}}{Q_1} \right| 100 \%$$
$$k = \left| \frac{150 - 150,6}{150} \right| 100 = 0,4 \% < 10 \%$$

Умова виконується.

Розрахуємо потужність другої гілки з урахуванням типу конденсаторів:

$$Q_{2\text{розр}} = 2 \cdot Q_{1\text{розр}}$$
$$Q_{2\text{розр}} = 2 \cdot 150,6 = 301,2 \text{ кВАр}$$
$$Q_2 = \frac{q_2}{2}$$
$$Q_2 = \frac{600}{2} = 300 \text{ кВАр}$$

Виконаємо порівняння:

$$k = \left| \frac{300 - 301,2}{300} \right| 100 = 0,4 \% < 100 \%$$

Умова виконується.

Розрахуємо потужність третьої гілки з урахуванням типу конденсаторів:

$$Q_{3\text{розр}} = 4 \cdot Q_{1\text{розр}}$$
$$Q_{3\text{розр}} = 4 \cdot 150,6 = 602,4 \text{ кВАр}$$
$$Q_3 = \frac{q_3}{2} \cdot 2$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_3 = \frac{600}{2} \cdot 2 = 600 \text{ кВАр}$$

Виконаємо порівняння:

$$k = \left| \frac{600 - 602,4}{600} \right| 100 = 0,4 \% < 10 \%$$

Умова виконується.

Повна потужність установки компенсації складатиме:

$$Q_H = 150 + 300 + 600 = 1050 \text{ кВАр}$$

Кількість конденсаторів типу q_1 становитиме:

$$N_{q1} = q_1 \cdot M$$

$$N_{q1} = q_1 \cdot 2 = 2 \text{ штуки}$$

Кількість конденсаторів типу q_2 становитиме:

$$N_{q2} = q_2 \cdot M$$

$$N_{q2} = q_2 \cdot 2 = 2 \text{ штуки}$$

Кількість конденсаторів типу q_3 становитиме:

$$N_{q3} = q_3 \cdot M$$

$$N_{q3} = q_3 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 4 \text{ штуки}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6 Розрахунок струму гілок пристрою в колі з конденсаторними батареями

Розрахунок струму, який протікає в колі компенсуючого пристрою визначається з урахуванням усіх діючих вищих гармонік та основної гармоніки:

$$I_n = I_i \cdot k_\Gamma$$

$$I_i = \frac{U_H}{X_i}$$

де X_i – опір гілки з урахуванням гармонік;

k_Γ – коефіцієнт, який враховує опір кола всім гармонікам, $k_\Gamma = 1,2$.

Розрахунок струму в колі першої гілки:

Опір кола:

$$X_1 = X_{C1}$$

Ємнісний опір:

$$X_{C1} = \frac{U^2}{Q_1}$$

$$X_{C1} = \frac{27500^2}{150000} = 5041 \text{ Ом}$$

Загальний опір кола на першій гармоніці:

$$X_1 = 5041 \text{ Ом}$$

Струм першої гілки компенсуючого пристрою:

$$I_{(1)} = \frac{27500}{5041} \cdot 1,2 = 6,55 \text{ A}$$

Розрахунок струму в колі другої гілки:

Опір кола:

$$X_2 = X_{C2}$$

Ємнісний опір:

$$X_{C2} = \frac{U^2}{Q_1}$$
$$X_{C2} = \frac{27500^2}{300000} = 2520 \text{ Ом}$$

Загальний опір кола на першій гармоніці:

$$X_2 = 2520 \text{ Ом}$$

Струм другої гілки пристрою:

$$I_{(2)} = \frac{27500}{2520} \cdot 1,2 = 13,09 \text{ A}$$

Розрахунок струму в колі третьої гілки:

Опір кола:

$$X_{C3} = \frac{27500^2}{600000} = 1260,4 \text{ Ом}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний опір кола на першій гармоніці:

$$X_2 = 1260,4 \text{ Ом}$$

Струм третьої гілки пристрою:

$$I_{(3)} = \frac{27500}{1260} \cdot 1,2 = 26,2 \text{ А}$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку

Величина	Перша гілка	Друга гілка	Третя гілка	Сума
Потужність Q, кВАр	150	300	600	1050
Струм I, А	6,55	13,09	26,2	45,84

2.7 Вибір силових швидкодіючих тиристорів

Використовуючи дані з таблиці вибираємо силовий тиристор типу 5SHX 06F6010, параметри даного тиристора записуємо в таблицю 2.3.

Можна помітити що струму, на який розрахований тиристор достатньо для того, щоб використовувати його в гілці в одному екземплярі. Але номінальної напруги тиристора буде не достатньо для використання його в колі з напругою 10 кВ.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики тиристорів 5SHX 06F6010

Тип елемента	Максимальний робочий струм I, А	Струм включення $I_{вкл}$, мА	Середнє значення струму I_C , мА	Керуюча напруга відкриття $U_{кер}$, В	Номінальна напруга U_H , В	di/dt , А/мкс	Середня частота переключень F, Гц	T, °C
5SHX 06F6010	520	215	215	3,5	5500	220	500	- 60..+125

Розрахуємо кількість послідовно з'єднаних тиристорів в одній із гілок:

$$N_T = \frac{U_{mc}}{U_{nm}} \cdot k_3$$

де k_3 – коефіцієнт запасу.

$$N_T = \frac{27500}{5500} \cdot 1,2 = 6$$

Отже, $N_T = 6$.

Визначимо загальну кількість тиристорів:

$$N_{\text{загт}} = N_T \cdot 3$$

$$N_{\text{загт}} = 6 \cdot 3 = 18 \text{ штук}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АВТОМАТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НА БЕЗКОТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

3.1 Статичний пристрій компенсації реактивної потужності

При швидких і різкозмінних навантаженнях є перспективним використання статичних компенсаторів реактивної потужності, які забезпечують безінерційне регулювання реактивної потужності. Їх використання буде поліпшувати умови статичної стійкості енергосистеми, а отже буде забезпечувати додаткову економію енергоресурсів і коштів, за рахунок підвищення техніко-економічних показників роботи електроустановок.

Як ми знаємо, компенсуючі пристрої складаються в основному з конденсаторних установок, які в свою чергу складаються з: згладжуючих реакторів і КБ. На залізницях України не застосовують синхронні компенсатори, тому що 1 кВАр реактивної енергії таких пристроїв на напрузі 1 кВ буде коштувати набагато дорожче, ніж 1 кВАр енергії КБ. В основному використовуються неавтоматизовані системи компенсації, тобто ті в яких включення, або відключення віток з конденсаторами відбувається вручну. В системах тяги зі змінним навантаженням застосування неавтоматизованих систем не є доцільним, тому що може викликати перекомпенсацію, або недокомпенсацію[4].

Статичні компенсатори реактивної потужності є перспективними в раціональній КРП, завдяки своїм властивостям:

- можливість симетрування навантажень;
- можливість швидкодіючого регулювання;
- можливість придушення коливань напруги;
- можливість плавного регулювання реактивної потужності, що видається в мережу;
- відсутність обертових частин.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Статичні компенсуючі пристрої мають такі переваги:

- мінімальні спотворення напруги живлення;
- можливість споживання і регулювання реактивної потужності;
- висока швидкодія зміни реактивної потужності;
- достатній діапазон регулювання реактивної потужності.

Статичні компенсатори мають наступні основні елементи:

- дросель та конденсатор – накопичувачі електромагнітної енергії;
- вентилі – транзистори, або тиристори, які забезпечують швидке

перетворення електромагнітної енергії[9].

Саме тому я вбачаю їх доречність для електротяги.

В даній роботі я пропоную використовувати такий пристрій компенсації, який не буде мати реактора. Беручи до уваги тип ТП і розміри реактора я пропоную використовувати в якості компенсаторів косинусні конденсатори.

До сьогоднішнього дня не існувало елементної бази для винайдення пристрою, який би втримав достатню напругу в 10...30 кВ і при цьому б залишився достатньо легко керованим і швидкодіючим. Світові лідери з виготовлення силової комутаційної апаратури пішли далеко в цьому напрямку. З'явилися високовольтні керовані транзистори відомі під назвою IGBT, а також керовані тиристори IGCT, які є нащадками закриваючих тиристорів GTO. Робоча напруга цих елементів досягає 6,5 кВ при достатньо високих струмах до 2000 А і швидкості їх спрацювання: для IGBT – 10 МГц, GTO і IGCT – 1 МГц[7].

Для низьковольтних кіл були винайдені схеми автоматичного керування цими елементами, які складаються з декількох секцій до яких під'єднані косинусні конденсатори. В цих схемах кількість ступенів компенсації залежить від кількості віток, які під'єднані до пристрою керування. Ступенів може бути від 2 до 8, і ємність конденсаторів розподілена між ними у такому порядку $2N+2N+N+N$, де N – найменша

					02.15.EC2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ємність.

Проаналізувавши існуючі схеми, та елементну базу в даній роботі розроблений статичний пристрій компенсації реактивної енергії для залізничного транспорту на напругу 27,5 кВ на безконтактних елементах з тиристорними ключами. Схема автоматичного керування має альтернативний спосіб переключення ступенів компенсації. Даний пристрій може точно регулювати коефіцієнт потужності. Кількість ступенів компенсації сягає 8, але в даній роботі я пропоную використовувати тільки 3 з них. За допомогою цих ступенів можна досягнути 7 режимів роботи. Це видно з таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Таблиця істинності роботи пристрою

Двійковий код				Десятькове число
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7

Силовa схема керування забезпечує включення і відключення КБ за допомогою статичних елементів керування. Прийнята схема на тиристорах. Застосування новітніх тиристорів надає змогу включати їх без зрівняльних діодів, або резисторів. Тому в будову тиристора включено зрівняльний елемент. Хоча на схемі керування дані діоди присутні.

Для даного пристрою компенсації можливе застосування силових схем показаних на рис. 3.1, 3.2 . Всі вони мають свої переваги та недоліки. Їх виконання також має ряд відмінностей. Відразу видно що схеми виконані на силових тиристорах. В дипломному проекті для розрахунку взято також схему на силових тиристорах. По швидкодії та управлінню значно кращі транзисторні компенсатори, але їх ціна буде вищою, ніж ціни на силові

тиристори. Також варто зазначити про їх виконання, тобто включення силових компонентів по мостовій схемі що зменшує кількість силових елементів.

3.2 Пристрій автоматичного управління компенсацією реактивної енергії

Для автоматичного управління компенсацією реактивної енергії пропонується використовувати регулятор потужності фірми LOVATO ELECTRIC S.P.A. виконаний на мікропроцесорах. Цей пристрій має великий світлодіодний дисплей на якому вказуються виміряні величини. Особливістю пристрою є його можливість ручного налаштування. Також регулятор може працювати в автоматичному режимі, за необхідністю можна перевести і в ручний режим роботи. Даний прилад має велику точність виміру.

Основними перевагами даного регулятора є:

- автоматичне визначення регулятором ємності ступенів;
- цифрове програмування;
- вимірювання гармонік (напруги та струму до 31-ої) та напруг (лінійних і фазних);
- 8-ступенева конфігурація в корпусі;
- наявність інтерфейсів RS-485 та RS-232 для контролю та програмування;
- добре читаний подвійний дисплей 144 × 144 мм;
- можливість забезпечення захисту від перегріву конденсаторної установки;
- роздільний вхід вимірювання напруги;
- забезпечення захисту конденсаторів від перевантажень і виходу з ладу; ведення журналу подій (перенапруження, провали і т.д.).

Запропонований пристрій володіє високими технічними характеристиками. Тобто його можна легко підключити до мережі 27,5 кВ за

					02.15.EC2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

допомогою трансформаторів наруги і струму. Робоча вимірювальна напруга приладу дорівнює 100 – 660 В. Щодо вхідного струму, то він становить 5 А. Живлення отримує від мережі 220 В змінного струму. В деяких випадках може працювати від напруги 110 В.

Даний пристрій має 8 ступенів, з яких використовують лише 3 ступені, для КБ. Ще одну ступінь використовують для захисту приладу. Тобто при зміні будь-якого з вимірюваних параметрів, ця ступінь може відключити повністю КБ і власне живлення. Для покращення роботи конденсаторів можна використовувати ще одну ступінь, для включення кондиціонування.

При першому включенні даний пристрій потрібно налаштувати. До налаштування регулятор буде працювати в ручному режимі. Можна налаштувати такі параметри:

- діапазон регулювання $\cos(\varphi)$;
 - найменший крок реактивної потужності;
 - час переключення;
 - струм первинної обмотки трансформатора струму;
 - кількість ступенів регулювання (окрім двох останніх);
- номінальну напругу КБ.

До додаткових переваг приладу можна віднести його можливість авто-налаштування. В такому режимі пристрій може сам вимірювати вище вказані величини і ємності батарей. Після чого перейде в автономний режим роботи. Для різко-змінних навантажень таке налаштування потрібно проводити по декілька разів.

Вихідними елементами керування конденсаторними установками в даному пристрої є електромагнітні реле. Хоча по швидкодії ці реле є досить високими, але по струму і напрузі цих реле буде мало для включення і відключення КБ на шину 27,5 кВ. Саме для цього і служить силова схема управління. Вихідні реле підключаються на вхід силової схеми керування. Застосування в схемі управління тиристорів надає змогу швидко реагувати на

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

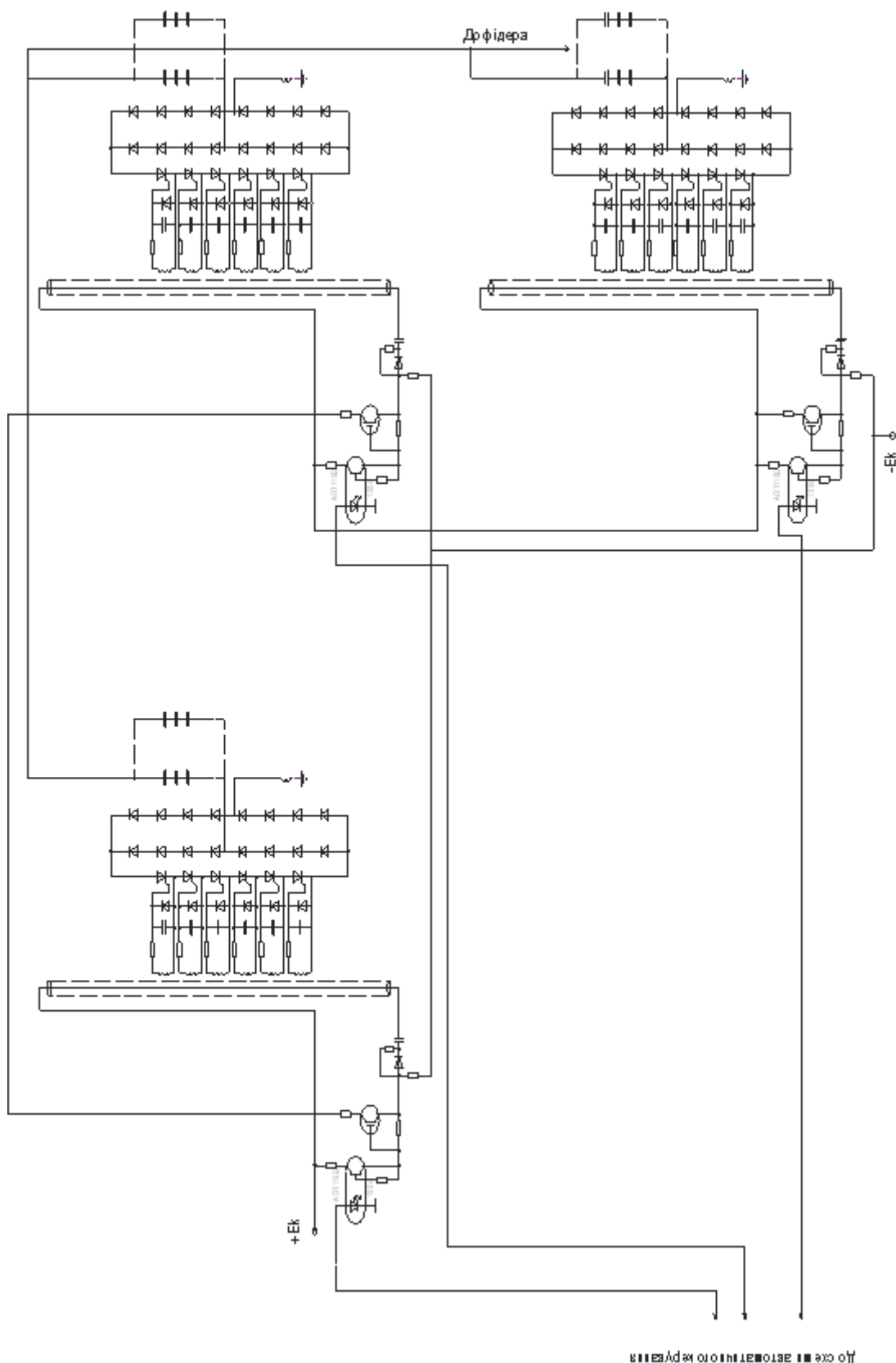


Рисунок 3.1 – Схема силових ключів на базі тиристорів, при прямому включенні до фідера напругою 27,5 кВ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.EC2021.РД.2021–ПЗ

Арк.

55

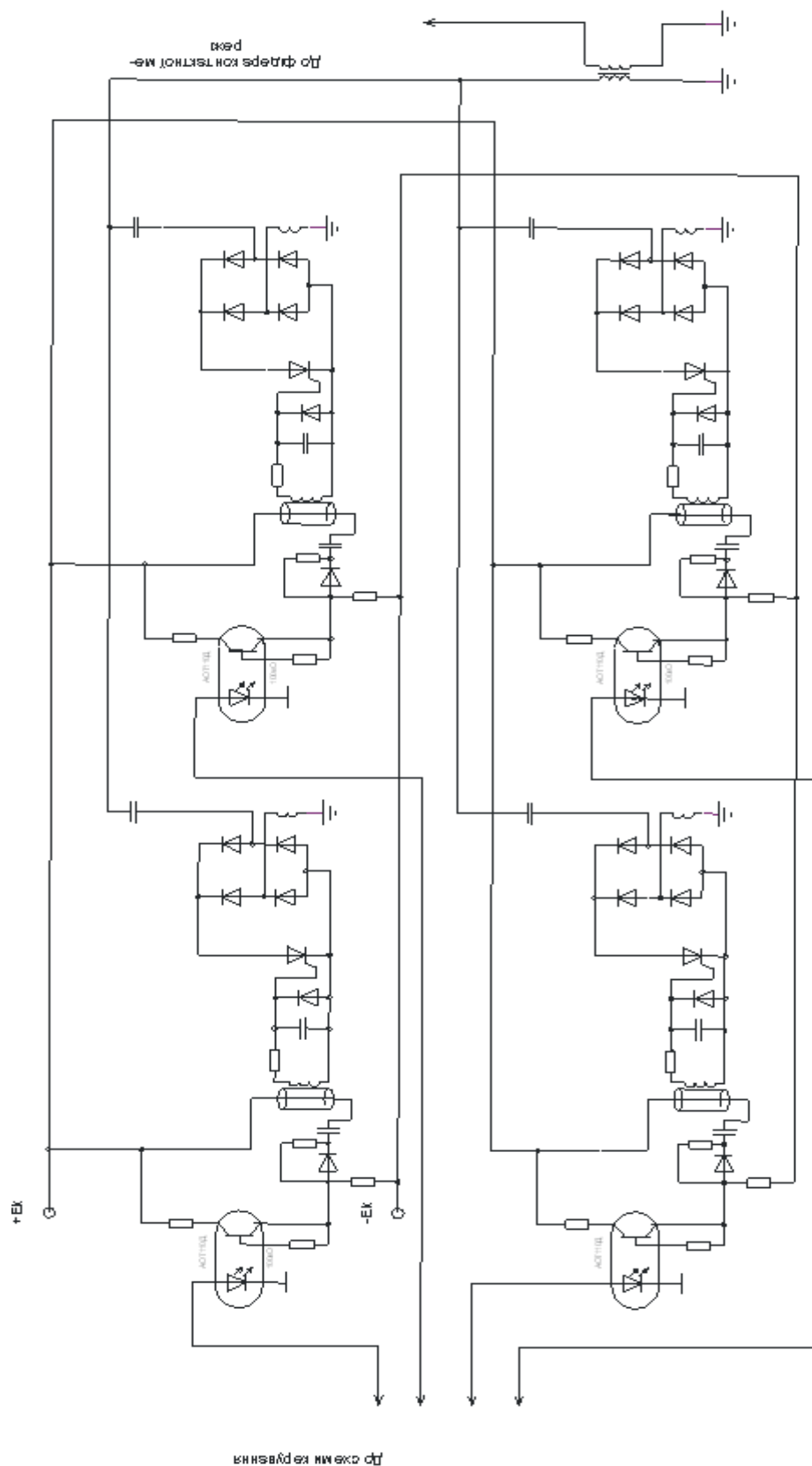


Рисунок 3.2 – Схема силових ключів на базі тиристорів, при включенні до шини 27,5 кВ

					02.15.EC2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

зміни навантаження в мережі. Новітні тиристори можна використовувати без зрівнюючих елементів.

А сучасні конденсатори можуть містити в собі значний потенціал по перевантаженню, а також можуть мати шунтуючий резистор для захисту. Щодо самого регулятора, то і він має декілька видів захисту. Так наприклад, захист можна налаштувати по:

- перенапрузі, або її провалах;
- великому струмі, або його провалах;
- перекомпенсації;
- недокомпенсації;
- перевантаженні КБ.

Беручи до огляду з вище вказане, видно що даний регулятор є досить прогресивним пристроєм в системі компенсації реактивної енергії. Розглянувши ситуацію з компенсацією на нашій ділянці маємо повне обґрунтування щодо застосування такого, чи подібного пристрою. Стосовно вартості елементів, то основним обладнанням в цьому плані будуть конденсатори, адже їхня вартість буде більшою порівнюючи з іншими елементами схеми. Вартість мікропроцесорного регулятора буде в десять разів меншою за вартість конденсаторів.

Основними можливостями даного статичного пристрою КРП є:

- відсутність стрибків струму і напруги при перемиканнях, так як вони відбуваються в момент переходу напруги через 0;
- виключення генерації реактивної потужності в живлячу мережу;
- плаваюча витримка часу між переключеннями;
- виключення перенапружень мережі, оскільки немає перекомпенсації;
- автоматичне відстежування змін навантажень і корегування $\cos(\varphi)$;
- контроль за роботою елементів конденсаторної установки;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

- можливість регулювання вручну поточного значення $\cos(\varphi)$ [9].

Конденсаторні установки застосовуються не тільки для того, щоб уповільнити обертання лічильника реактивної енергії. Їх застосування дозволяє вирішити ряд проблем, що виникають на виробництві:

- знизити встановлену потужність силових трансформаторів (при зниженні споживання реактивної потужності знижується споживання повної потужності);
- забезпечити живлення навантажень по ЛЕП з меншим перетином;
- підключити додатково корисне навантаження;
- уникнути глибокої просадки напруги на віддалених електроспоживачах.

Основними перевагами використання конденсаторних установок є:

- невеликі капіталовкладення;
- відсутність обертових частин;
- відсутність шуму під час роботи;
- можливість встановлення та підключення в будь-якому місці мережі;
- можливість підбору будь-якої необхідної потужності[4].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВОК

В даній дипломній роботі було досліджено ефективність роботи статичного компенсуючого пристрою реактивної енергії на ділянці зі змінною напругою 27,5 кВ з плавним регулюванням на безконтактних елементах. Одним з найважливіших моментів у вирішенні цього питання є збільшення якості електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом встановлення статичних компенсуючих пристроїв для компенсації реактивної потужності без будівництва нових підстанцій, а з модернізацією вже існуючих, що суттєво зменшить затрати.

В даній магістерській роботі я намагався показати, що можливо збільшити якість електроенергії та зменшити реактивну потужність в тяговій мережі за рахунок встановлення на тягових підстанціях косинусних конденсаторів, а також регулятора потужності фірми LOVATO ELECTRIC S.P.A. виконаного на мікропроцесорах, при цьому не використовуючи реактор. З огляду на вище описаний матеріал запропонований пристрій компенсації реактивної потужності надає такі можливості:

- виключення генерації реактивної потужності в живлячу мережу;
- виключення перенапружень мережі;
- автоматичного відстежування змін навантажень і корегування $\cos(\varphi)$;
- контролю за роботою елементів конденсаторної установки;
- ручного регулювання поточного значення $\cos(\varphi)$.

Викладена у дипломі розробка компенсуючого пристрою являє собою збільшення якості електроенергії, а також зменшення реактивної потужності в тяговій мережі змінного струму 27,5 кВ. Таким чином вирішення цієї проблеми повинно базуватись на проведенні переоснащення господарства електропостачання і його модернізації, та технічного розвитку, та енергоефективності на залізничному транспорті.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання дипломних проектів та робіт / уклад.: В. Г. Сиченко, В. О. Дьяков, О. О. Матусевич, М. С. Пастушенко; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – 36 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог – М.:Транспорт,1982. – 528с.
3. Герман Л. А., Серебряков А. С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 315 с
4. Прохорский А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции: Изд. 3-е, перераб. и доп. Учебник для техникумов жел.-дор. трансп. М.: Транспорт, 1978. 536 с.
5. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Затв.: Наказ Міністерства палива та енергетики України 17.01.2002 №19 / Мін-во палива та енергетики України. – К., 2002. – 12 с.
6. Мамошин Р. Р. Выбор типа компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения Р. Р. Мамошин, Л. А. Герман // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 5. – С. 26–29.
7. Рогачёв К. Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [Электронный ресурс] / К. Д. Рогачёв.
8. Бондар О. І., Бондар І. Л. Оцінка впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в електромережі залізничного вузла – Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – 5 с.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

9. Статические компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей. Сб. статей. Под ред. В. И. Кочкина. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2010. – 296 с.
10. Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Мизинцев А.В. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – №5. – С. 56-62.
11. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
12. Молин Н.И., Соколовский И.А., Щербаков В.С. Установка продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения переменного тока // Материалы 5-го межд. симпозиума «Элтранс-2009». – СПб.: ПГУПС, 2010. – С. 155-165.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61