

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри
_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії**

Тема **Оптимізація електроспоживання в системі електропостачання змінного струму в умовах підвищення швидкостей руху**

Theme **Optimization of power consumption in the AC power supply system in conditions of increasing speeds**

Керівник дипломної роботи доц. _____ В. О. Дьяков

Нормоконтролер доц. _____ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1927 _____ В. В. Кононенко

Student Kononenko Viktor

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту

Імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії
«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о зав. кафедри

_____ Босий Д.О.
{підпис}

«17» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС _____ магістр
{освітньо-кваліфікаційний рівень }

студента групи ЕС1927 _____ Кононенко В.В.
{номер групи} {ПІБ}

1 Тема дипломного проекту {роботи} Оптимізація електроспоживання в системі електропостачання змінного струму в умовах підвищення швидкостей руху.

затверджена наказом по університету від «16» 09 2020 р. № 494ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту {роботи} параметри електрифікованої ділянки, режимні карти ЕРС, параметри тягових підстанцій .

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: проаналізувати показники якості електроспоживання електрифікованих залізниць змінного струму, розробити математичну модель електротягової мережі і електровозів з перетворювачами однофазно - постійного струму.

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

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

КАЛЕНДАРЬНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Огляд розділу, %
ВСТУП	17.09	5
АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ	21.10	25
ТЕОРИТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО - ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	30.10	15
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ І ЕЛЕКТРОВОЗІВ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	01.11	15
РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕРС	11.11	15
ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ НОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МОБІЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	27.11	15
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	03.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдань «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

_____ (підпис)

_____ к.т.н., доц. Дьяков В.О.

_____ (ПБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

_____ Кононенко В.В.

_____ (ПБ)

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 94 сторінки, складається з 5 розділів та містить 28 ілюстрацій, 11 таблиць, 15 використаних джерел.

Мета дипломної роботи - дослідження показників системи електричної тяги в залежності від характеристик тягового електроприводу з різними типами перетворювачів.

Система електричної тяги - тягова підстанція - електрорухомий склад є потужним нелінійним динамічним навантаженням для ліній зовнішнього електропостачання, яке разом з районною підстанцією спотворює якість електроенергії. Ступінь спотворення якості електричної енергії можна встановити на основі результатів спектрального аналізу осцилограм напруг і струмів, які можуть бути отримані на реально діючих електрифікованих ділянках.

Параметри рухомого складу суттєво впливають на витрату енергії, особливо його аеродинамічні характеристики, ефективність тягового приводу і зниження маси тари за рахунок модернізації конструкції вузлів, агрегатів або застосування більш легких матеріалів.

Якість електроспоживання в електротяговій мережі залежить від технічних характеристик і енергоефективності перетворення електроенергії в механічну енергію руху ЕРС, від схеми живлення і інших параметрів електротягової мережі. Мережа включає енергетичні ланки тягових підстанцій, контактної і зворотного тягової мережі. Якість електроспоживання також залежить від організації руху з реальним профілем колії і факторів зовнішнього середовища.

Ключові слова : ЕЛЕКТРИЧНА ТЯГА ЗМІННОГО СТРУМУ, ВИСОКОШВИДКІСНИЙ РУХ, НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	12
1.1 Вплив технічних засобів і організації руху на енергоефективність електрифікованих ліній залізниць.....	12
1.2 Енергоспоживання на лініях з інтенсивним вантажним і пасажирським Рухом.....	15
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО – ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	17
2.1 Енергетична взаємодія електровозів однофазного струму з електротяговою мережею.....	17
2.2 Характеризуючі енергетичні показники системи електротягова мережа – ЕРС.....	22
2.2.1 Спектральний склад струму мережі живлення і випрямленої напруги на ЕРС.....	23
2.2.2 Спектральний склад напруги в електротяговій мережі.....	27
2.2.3 Реактивна потужність в електротяговій мережі.....	29
2.2.4 Коефіцієнт потужності електричних споживачів електротягової мережі..	33
2.3 Аналіз енергетичної взаємодії з електротяговою мережею імпульсного перетворювача однофазно-постійного струму модуляційного типу.....	34
2.4 Висновки до розділу.....	51
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ І ЕЛЕКТРОВОВІЗІВ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	52

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис					
Розроб.		Кононенко В.В			Оптимізація електроспоживання в системі електропостачання змінного струму в умовах підвищення швидкостей руху	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Дьяков В.О					5	94
Н. Контр.		Міщенко Т.Н				ДНУЗТ, ІСЕ, ЕС1927 _{гр.}		
Затверд.								

3.1 Вибір програмно-апаратної бази для моделювання.....	52
3.2 Імітаційна модель системи електропостачання змінного струму.....	54
3.3 Імітаційна модель електротягової мережі і електровозів з перетворювачами однофазно-постійного струму.....	60
3.4 Висновки до розділу.....	67
4. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕРС.....	68
4.1 Параметри і характеристики модельованої ділянки ТП1 – ТП3.....	68
4.2 Режими електротягової мережі при експлуатації електровозів ВЛ-80р і HRCS2.....	72
5. ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ НОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МОБІЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	81
5.1 Дослідження енергетичних показників і розробка заходів щодо зниження питомої витрати електроенергії.....	81
5.2 Висновки до розділу.....	88
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	91
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Однією з пріоритетних сучасних завдань Укрзалізниці є підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів для задоволення потреб соціально-економічного розвитку країни. Рішення завдання дозволить поліпшити транспортне обслуговування населення, збільшити обсяг і прибутковість пасажирських перевезень, а також можливість інтегруватися в міжнародну мережу.

Концепцією розвитку залізниць України передбачається переведення основних електрифікованих залізниць на роботу з пропуском швидкісних пасажирських поїздів в пакетному графіку на лініях з поєднаним (змішаним) вантажним і пасажирським рухом.

В концепції також зазначається про необхідність інноваційного розвитку, про введення сучасних технологій з переходом на новий технологічний уклад подолання стратегічного відставання. Це відставання пов'язане в першу чергу з низькими темпами застосування новітніх ресурсозберігаючих технологій і пристроїв, а також з тим, що застосовувані технічні засоби - рухомий склад та пристрої електропостачання поступаються за своїми параметрами і характеристиками закордонними аналогам провідних закордонних залізничних компаній світу.

На частині залізничних напрямків, електрифікованих на змінному струмі 25 кВ 50 Гц, розпочато роботи по організації швидкісних електропоїздів з тяговими асинхронними двигунами, автономними інверторами напруги і вхідними реверсивними перетворювачами однофазно-постійного струму модуляційного типу. При суміщеному графіку руху застосовуються традиційні електровози ВЛ-80р.

Якість електроспоживання різними ЕРС з зонно-фазовими і імпульсними перетворювачами істотно розрізняються за показниками споживання реактивної потужності, завантаження електротягової мережі вищими гармонійними струму. Спільне електроживлення від тягових підстанцій зазначених типів

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрорухомого складу (ЕРС) визначає формування специфічних навантажень на систему тягового електропостачання (СТЕ). У цих умовах особливо актуальним стає завдання вивчення особливостей роботи електротягових мереж в режимах тяги і рекуперативного гальмування на залізницях України, спрямованого на вирішення проблеми ресурсозбереження, економії електроенергії, підвищення енергетичної безпеки, в тому числі, на лініях підвищених швидкостей руху.

Актуальність дипломної роботи полягає в тому, що вона присвячена дослідженню способів і засобів підвищення якості електроспоживання в системі електричної тяги змінного струму, що забезпечує поліпшення показників надійності та енергоефективності і безпеки електрозабезпечення при швидкісному і великоваговому русі пасажирських поїздів і вантажних складів. На найважливіші показники енергоефективності має суттєвий вплив ЕРС, його головні енергетичні комплекси - вхідні перетворювачі змінно-постійного струму.

Дослідження, проведене в роботі, дозволило виявити найважливіші залежності енергетичних показників системи електричної тяги від характеристик тягового електроприводу з різними перетворювачами і від технологій по організації суміщеного руху.

Ступінь розробленості проблеми.

Вирішенню завдань підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки на залізничному транспорті, електрифікованому на однофазному змінному струмі 25 кВ 50 Гц з ЕРС різних поколінь і сучасних магістралей зі швидкісним і високошвидкісним рухом, присвячені роботи А.Є. Алексєєва, Р.Р. Мамошина, Б.Н. Тихменьова К.Г. Марквардта, Ю.М. Інькова, А.Н. Савоськіна, Л.А. Германа, В.Н. Пупиніна, В.Т. Черсмисіна, В.А. Гапанович, Ю.І. Жаркова, А.Т. Буркова, М.П. Бадьора, А.Б. Косарева, Б.І. Косарева та інших фахівців. У даних роботах вирішувалися завдання вдосконалення в умовах застосування традиційних систем ЕРС. Поява на ЕРС нового покоління перетворювального електрообладнання на базі унікальних напівпровідникових приладів - силових транзисторів з ізолюваним затвором (БТІЗ - IGBT) розширило простір наукових досліджень.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою дипломної роботи є дослідження показників системи електричної тяги в залежності від характеристик тягового електроприводу з різними типами перетворювачів.

З цією метою в дипломній роботі поставлені і вирішені наступні задачі:

- виконаний аналіз чинників, що викликають зниження якості енергозабезпечення тяги поїздів на лініях однофазного змінного струму через нелінійні спотворення напруги і струму, завантаження електротягової мережі неактивними потоками електроенергії і відхилення рівня напруги в контактній мережі;
- розроблена методика дослідження якості електроспоживання в електротяговій мережі з нелінійними спотвореннями;
- створена імітаційна модель, що дозволяє відтворювати функції обробки даних модельних вимірювань об'єкта, адекватні реальним для умов застосування на ЕРС перетворювачів однофазно-постійного струму з різними алгоритмами управління в режимах тяги і рекуперативного гальмування;
- виконано оцінку якості і рівня питомого споживання електроенергії на ділянках зі швидкісним рухом при роздільній і спільній експлуатації ЕРС з різними алгоритмами управління перетворювачами;

Об'єкт дослідження. Електрифіковані залізничні лінії України з електротяговою мережею однофазного змінного струму 25 кВ 50 Гц і ЕРС з зонно-фазовим і імпульсним управлінням вхідними перетворювачами в умовах роботи з підвищеними швидкостями.

Предмет дослідження. Виявлення чинників, що впливають на показники якості електроспоживання, енергетичні залежності, що характеризують надійність, енергоефективність та безпеку при роздільній і спільній експлуатації по схемотехнічному виконанню вхідних перетворювачів електричного тягового електроприводу.

Наукова новизна результатів полягає у вирішенні теоретичних і практичних задач, присвячених дослідженню і оцінці показників якості електроспоживання в системі тягового залізничного електроспоживання на лініях

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з використанням ЕРС різного типу, а саме, автором:

- розроблено імітаційну модель електричної залізниці, що включає систему зовнішнього і тягового електропостачання і враховує нові технології перетворення електроенергії при спільній роботі різних ЕРС в режимі тяги і рекуперативного гальмування, що відрізняється можливістю виконання аналізу показників якості електроспоживання в електротяговій мережі в умовах застосування ЕРС з різними енергетичними характеристиками;

- обгрунтовані і застосовані методи обробки великих масивів статистичних даних для специфічних умов формування електричних навантажень в електротяговій мережі з різко вираженою нерівномірністю до імпульсних характерів процесів електроспоживання при використанні нового типу імпульсних реверсивних чотирьохкватратних перетворювачів в режимах тяги і рекуперативного гальмування;

- запропонована технологія використання імпульсних реверсивних чотирьохкватратних перетворювачів ЕРС для реалізації додаткової функції мобільного компенсатора реактивної потужності, включаючи режими спільної роботи з іншими ЕРС на зоні узгодженої напруги електроживлення.

Практична значимість роботи полягає в наступному:

1. Запропоновано методику визначення питомого споживання електроенергії ЕРС на ділянках підвищених швидкостей руху з урахуванням можливості підвищення коефіцієнта потужності на ЕРС за рахунок використання реверсивних імпульсних чотирьохкватратних перетворювачів модуляційного типу і поліпшення гармонійного складу струму електротягової мережі;

2. Розроблено пропозиції щодо заходів підвищення якості електроспоживання при спільній експлуатації ЕРС з різними типами перетворювальних установок змінно-постійного типу.

Дипломна робота є частиною досліджень, виконаних у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

імені академіка Лазаряна на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання»

Методологія і методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань в роботі виконані узагальнення і аналіз матеріалів науково - технічної літератури, використані методи математичного аналізу та імітаційного моделювання в програмних пакетах Matlab / Simulink, методи обробки статистичних даних, методи теоретичних та експериментальних досліджень.

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 на міжнародній науковій конференції «Розвиток наукової думки постіндустріального суспільства: сучасний дискурс» (Миколаїв, 13 листопада 2020 рік).

Публікації. Кононенко В.В. Вдосконалення електроспоживання в системі електричної тяги в умовах підвищення швидкостей руху на залізницях України / В.В.Кононенко // Розвиток наукової думки постіндустріального суспільства: сучасний дискурс: тези доп. Міжнародної наукової конф,(13.11.2020).- Миколаїв,2020.- с. 12-14. ISBN 978-617-7171-46-0. DOI 10.36074 / 13.11.2020. v2.

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Вплив технічних засобів і організації руху на енергоефективність електрифікованих ліній залізниць

Пріоритетними завданнями енергетичної стратегії з енергозбереження є значне зниження питомої витрати енергетичних ресурсів в діяльності залізниць України.

Основним напрямком заходів щодо зниження споживання енергетичних ресурсів є вдосконалення конструкцій інфраструктури та рухомого складу, а також методів управління рухом. Питання проектування інфраструктури повинні розглядатися в аспекті вкладу в зменшення втрат електроенергії, розширеного використання рекуперативного гальмування і підвищення ефективності оперативного управління рухом за рахунок розвинених систем зв'язку. Є пропозиція використовувати реверсивні тягові підстанції, здатні не тільки приймати рекуперативну енергію, але і повертати її в енергетичні системи загального користування, створювати електричні мережі з поліпшеними зв'язками між окремими ділянками, розробляти нові пристрої з метою підтримки належного рівня напруги в контактній мережі і застосовувати накопичувачі енергії [1].

Параметри рухомого складу суттєво впливають на витрату енергії, особливо його аеродинамічні характеристики, ефективність тягового приводу і зниження маси тари за рахунок модернізації конструкції вузлів, агрегатів або застосування більш легких матеріалів. Необхідно враховувати постійно зростаючу частку споживання електроенергії, що приходить на нетягові споживачі. Доцільно також розглянути вплив бортових накопичувачів енергії на її споживання і неминучого збільшення маси тари рухомого складу. Для визначення фактичного споживання електроенергії та успішного застосування заходів щодо його зниження необхідно встановити бортові лічильники електроенергії, а принцип модульності в конструкції поїздів дає можливість оперативно приводити місткість поїзда у відповідність з попитом на перевезення пасажирів, внаслідок чого,

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення числа місць для сидіння в вагонах поїздів нової конструкції веде до зниження питомої витрати енергії в розрахунку на одного пасажера.

При існуючій інфраструктурі і наявному рухомому складі, організаційні завдання щодо економного витрачання електроенергії можна вирішувати з тією ж необхідністю, що і експлуатаційні або комерційні. Належним чином також виступають розроблені графіки і розклад руху, що суттєво сприяють зниженню споживання енергоресурсів.

Крім того, необхідно враховувати, яким чином розподіляється запас часу на протязі всієї поїздки не тільки за критерієм пунктуальності відповідно до імовірного розподілу затримок по всій лінії, але також і за критерієм ефективності використання енергії. Можлива розробка моделей, що застосовуються при складанні графіків руху, які максимізують передачу рекуперативної енергії між потягами на одній ділянці.

Світовий досвід застосування різних систем електричної тяги постійного і змінного струму свідчить про переважне використання системи змінного струму промислової частоти 50 Гц.

Капітальні витрати на електрифікацію залізничних ліній при змінному струмі нижче на 15...18%, ніж при постійному. А число тягових підстанцій менше в 2...3 рази. Тягові підстанції значно простіші, в результаті чого значно нижчі витрати на їх технічне обслуговування. Легша контактна підвіска - економія міді становить понад 2 т на 1 км. Повністю знімається проблема зносу контактних проводів і їх періодичної заміни, виключається електрокорозія опор контактної мережі і підземних споруд [2].

Світовий досвід показує, що електрифіковані ділянки змінного струму в порівнянні з системою постійного струму, не поступаються за енергетичною ефективністю системі постійного струму 3 кВ. Сумарні втрати на таких ділянках менше на 5-6%. Разом з цим ділянки на змінному струмі мають важливу перевагу в провізній здатності. На них практично не обмежується норма маси поїздів. При рівних обсягах роботи на ділянках змінного струму потрібно на 15...20% менше локомотивів і локомотивних бригад. В результаті собівартість перевезень на

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ділянках змінного струму майже на 20% менше, ніж при електротязі постійного струму [2].

Система змінного струму забезпечує великі переваги в поетапному нарощуванні енергетичних можливостей електричної тяги, а при необхідності і в їх зниженні, наприклад, при спаді обсягів перевезень. Існуючі варіанти системи електропостачання змінного струму напругою 25 кВ і 2×25 кВ, багатопровідні, з екрануючими і підсилюючими проводами (ЕПП) та інші добре вписуються в ідеологію «Категорування» [3] ліній за обсягами перевезень (рис. 1.1).

Для кожної з названих систем тягового електропостачання існує своя «ніша» за обсягом перевезень (на рис. 1.1 вони заштриховані), в якій перевізний процес реалізується з оптимальною енергетичною ефективністю. Межі цих «ніш» залежать від багатьох факторів і перш за все від вартісних, але для кожної конкретної ділянки ці межі цілком визначені [4].

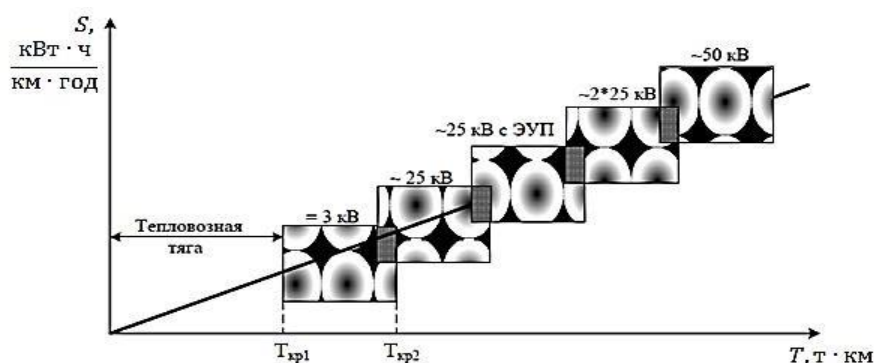


Рисунок 1.1 – Зони застосування різних систем тягового електропостачання за умовами оптимальної енергетичної ефективності (Т - критичний вантажообіг, при якому недоцільний перекид відповідно з тяги тепловоза на електричну і з постійного струму на змінний; S - середньорічне споживання електроенергії на 1 км електрифікованої лінії).

Виходячи з очевидних переваг електричної тяги змінного струму, не випадково в ряді країн почали переводити окремі «старі» ділянки з постійного струму на змінний.

У зв'язку з розвитком напівпровідникової перетворювальної техніки в останні роки за кордоном з'явилися електровози змінного струму 25 кВ з перетворювачами енергії змінного струму промислової частоти в енергію змінного струму регульованої частоти з напругою, необхідною для безпосереднього живлення тягових двигунів змінного трифазного струму. При цьому стає можливим використання найнадійнішого на сьогоднішній день двигуна - тягового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (ТАД).

1.2 Енергоспоживання на лініях з інтенсивним вантажним і пасажирським рухом

Роль залізниці з розвитком і модернізацією залізничної мережі є значущою і вагомою основою соціально-економічного зростання України. Укрзалізниця здійснює понад 70 % вантажоперевезень країни і фактично є технологічною ланкою її паливно-енергетичного комплексу в ланцюзі виробництва, передачі та споживання енергії. При цьому по питомій витраті енергоресурсів на одиницю перевізної роботи залізничний транспорт є найбільш економічним видом транспорту. На тлі випереджаючого зростання тарифів на енергоносії актуальність проблеми енергозбереження на залізничному транспорті з кожним роком зростає.

Електрифікація вельми вигідна з екологічної точки зору. Найважливішим фактором, що лімітує електрифікації залізниць є висока початкова вартість і необхідність комплексного підходу.

Потужність споживаної енергії окремими споживачами на електрифікованих ділянках залізниці розподіляється в часі нерівномірно. В окремі періоди часу потрібна потужність може бути значно вище, ніж її середнє значення за весь період роботи. Тому, для необхідного обсягу електроенергії, необхідного споживачеві, недостатньо визначити тільки достатню потужність пристроїв системи електропостачання як в енергосистемі, так і у самого споживача. Правильні припущення про розподіл потрібної потужності в часі дозволяють найбільш раціонально проектувати системи електропостачання і

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

вести їх експлуатацію. Найбільш зручною формою оцінки потреби в енергії є графіки навантаження споживачів в залежності від часу. Графіки навантаження тягових підстанцій електрифікованих ділянок залізниці мають специфічний характер, що полягає в різких і частих перепадах навантажень при відносно стійких середньодобових рівнях.

Потужність, яка потрібна електрифікованій ділянці від енергосистеми, залежить від числа потягів, їх категорій і розташуванні на даній ділянці в даний момент часу. Слід розрізняти звичайні залізниці з рухом вантажних, пасажирських і приміських поїздів і залізниці зі змішаним рухом високошвидкісних і швидкісних пакетів поїздів і звичайних пасажирських, вантажних і приміських поїздів [4].

Підвищенню електроспоживання також сприяє збільшення маси поїзда і швидкостей руху поїздів, обумовлені темпами розвитку вантажообігу і пасажиропотоку [5].

Важливо відзначити, що розвиваючи високошвидкісний і важковаговий вантажний рух, за рахунок чого збільшується пропускна і провізна спроможність ліній, необхідно акцентувати увагу на потребу значного енергоресурсу, а саме підвищення потужності, що підводиться до транспортної системи, тобто повинна бути забезпечена і енергетична безпека.

З вищесказаного можна зробити висновок, що подальший розвиток залізничного транспорту вимагає підкріплення ресурсами енергетики, що підкреслює актуальність даної проблеми в роботі, з подальшими дослідженнями використання рекуперативного гальмування, що сприяє енергоефективності споживання електроенергії.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО - ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Енергетична взаємодія електровозів однофазного струму з електротяговою мережею

Для вирішення поставленого в дипломній роботі завдання необхідно більш детально вивчити принципи енергетичної взаємодії електровозів однофазного струму з електротяговою мережею в режимах різних алгоритмів управління вхідними перетворювачами.

На рис. 2.1,а представлена еквівалентна схема силового ланцюга електровоза з зонно-фазним управлінням і ділянки електротягової мережі з зосередженими параметрами [6]. Індексом «ТП» позначені параметри трансформатора електротягової підстанції, «КМ» - контактної мережі, «Е» - трансформатора електровоза, « d » - контуру випрямленого струму. Еквівалентна ЕРС e_d заміщає напругу на затискачах узагальненого навантаження.

Виконаємо аналіз електромагнітних процесів в ланцюгах узагальненого однофазного мостового перетворювача класичним методом по інтервалах з припасуванням рішень на кордонах.

При аналізі прийняті наступні допущення:

- е.р.с. на вхідних шинах електротягової підстанції « e » синусоїдальна;
- тягова мережа володіє зосередженими параметрами, розподілена ємність C_{KC} не враховується;
- коефіцієнт трансформації трансформаторів дорівнює одиниці, струм намагнічування не враховується;
- магнітний ланцюг реактора, що згладжує, прийнятий лінійним;
- е.р.с. вважається постійною по амплітуді.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

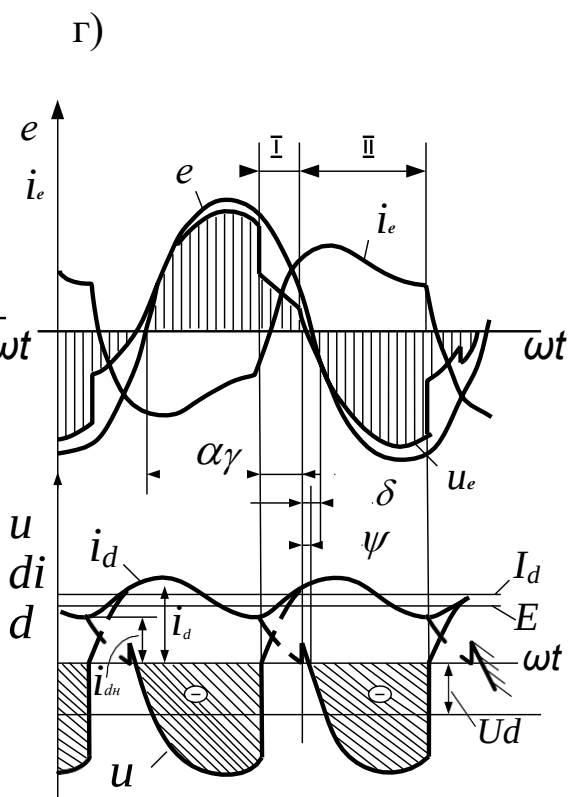
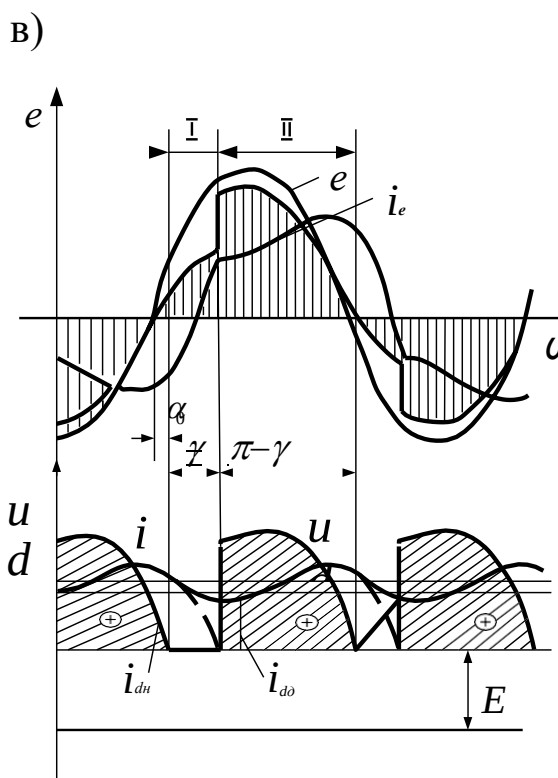
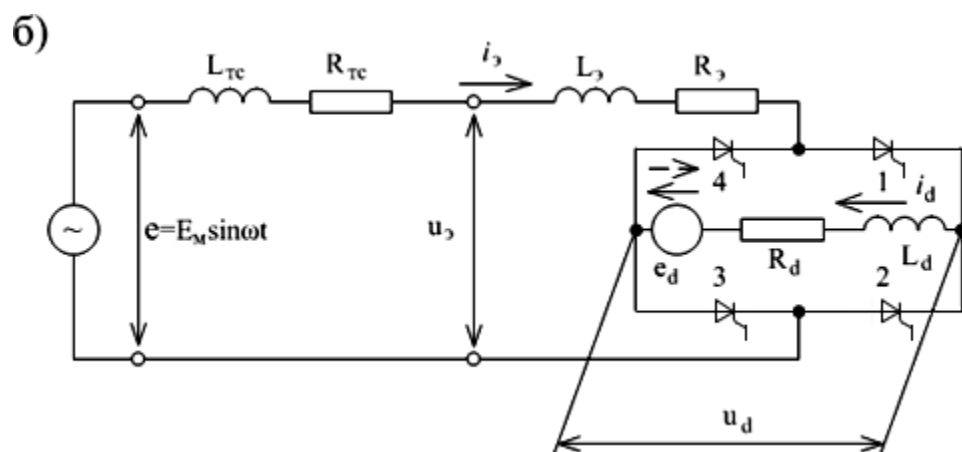
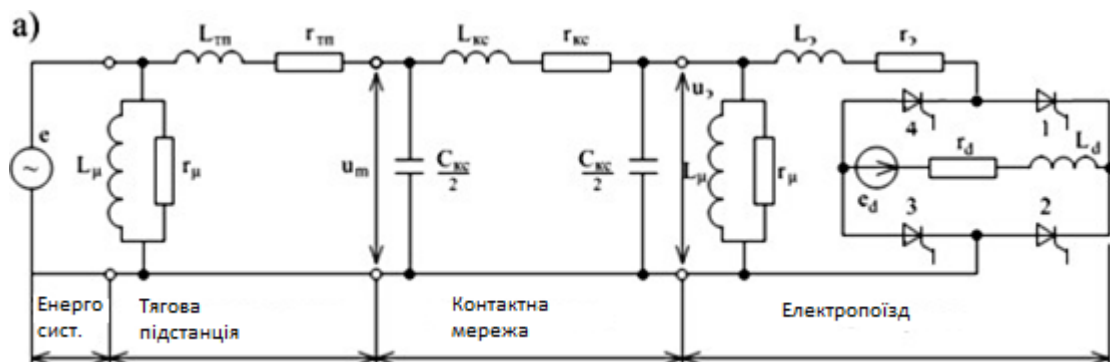


Рисунок 2.1 – Схема живлення електровоза (а, б) і діаграми напруг і струмів однофазного перетворювача в режимі випрямлення (в) і інвертування (г)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

З урахуванням прийнятих припущень узагальнена схема заміщення прийнята у формі, представлений на рис. 2.1, б. На схемі і в рівняннях стану використані наступні позначення:

$$\begin{aligned}
 R_{TC} &= R_{TP} + R_{KC}; \\
 L_{TC} &= L_{TP} + L_{KC}; \\
 R_{TC} &= R_{TP} + R_{KC} + R_{\Sigma}; \\
 L &= L_{TP} + L_{KC} + L_{\Sigma}; \\
 R_{\Sigma} &= R_{TP} + R_{KC} + R_{\Sigma} + R_d; \\
 L_{\Sigma} &= L_{TP} + L_{KC} + L_{\Sigma} + L_d.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Диференціальні рівняння для узагальненої схеми представлені для інтервалів комутації (I) і між комутаційних інтервалів (II), відповідно до рис. 2.1, в, г для випрямного та інверторного режимів:

Інтервал

$$\begin{aligned}
 \omega L \frac{di_y}{d\omega t} + R \cdot i_y &= e \quad ; \\
 \omega L_d \frac{di_d}{d\omega t} + R_d i_d &= -E
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

де E - проти-ЕРС, що виробляється тяговим двигуном в режимі випрямлення або ЕРС двигуна, що переходить у генераторний режим в режимі інвертування при рекуперативному гальмуванні;

інтервал II

$$\omega L_{\Sigma} \frac{di_{\Sigma}}{d\omega t} + R_{\Sigma} i_{\Sigma} = -E.
 \tag{2.3}$$

Приймемо початковий відлік

$$e = E_M \sin(\omega t + \alpha).$$

З трьох можливих режимів роботи перетворювача безперервного струму, переривчастого струму при відсутності комутації і переривчастого струму з інтервалом комутації практичний інтерес представляє перший режим (див. рис.2.1).

Граничні умови для цього режиму:

$$\begin{aligned} \omega t = 0 & \quad - i_o = i_{dH} = i_d; \\ \omega t = \gamma & \quad i_o = i_{dK} = i_d; \\ \omega t = \pi & \quad i_o = i_{dH} = i_d. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Точна кількісна оцінка рівнів напруги, спотворень струму і коефіцієнта потужності в режимах тяги і рекуперативного гальмування отримана шляхом інтегрування функції відповідних змінних від кута комутації перетворювача γ .

Середній струм в ланцюзі навантаження:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\gamma} i_{Id} d\omega t + \int_0^{\gamma} i_{IIId} d\omega t \right). \quad (2.5)$$

Середня випрямлена напруга:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\gamma}^{\pi} u_{dII} d\omega t. \quad (2.6)$$

Ефективний струм електровоза:

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\gamma} i_{\vartheta I}^2 d\omega t + \int_{\gamma}^{\pi} i_{\vartheta II}^2 d\omega t \right)} . \quad (2.7)$$

Ефективна напруга на струмоприймачі електровоза:

$$U_{\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\gamma} u_{\vartheta I}^2 d\omega t + \int_{\gamma}^{\pi} u_{\vartheta II}^2 d\omega t \right)} . \quad (2.8)$$

Кути α_0 і ψ , що представляють початковий кут відмикання діодів некерованого випрямляча і кут замикання тиристорів інвертора веденого мережею (див. рис. 2.1), визначимо з наступних умов.

При $\omega t = \alpha_0$, $u_{II} = 0$. Для цього моменту рівноваги первинного ланцюга:

$$E_M \cdot \sin \alpha_0 - \omega L \frac{di_{\vartheta \alpha 0}}{d\omega t} - R i_{\vartheta \alpha 0} = 0 .$$

Ланцюга випрямленого струму:

$$E - \omega L \frac{di_{\vartheta \alpha 0}}{d\omega t} - R i_{\vartheta \alpha 0} = 0 .$$

При спільному рішенні рівнянь отримано:

$$\sin \alpha_0 = \frac{E}{q E_M} + \frac{i_{\vartheta \alpha 0}}{E_M} \cdot \left(R - \frac{R_d}{q} \right) . \quad (2.9)$$

Аналогічно для інверторного режиму:

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sin \psi = \frac{E}{qE_M} + \frac{i_9(\gamma + \delta)}{E_M} \cdot \left(R - \frac{R_d}{q} \right). \quad (2.10)$$

Задаючись послідовним значенням γ , можливо визначити E , α_0 і ψ . В роботі [6] показано, що α_0 і ψ залежать головним чином від E і q і з похибкою менш 2 ел. град. для їх визначення можна скористатися спрощеними виразами:

$$\sin \psi = \sin \alpha_0 = \frac{E}{qE_M}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } q = \frac{L_d}{L}.$$

Як випливає з наведених вище аналітичних залежностей, комутатор в однофазних мостових ВПП електровозів приймає різні стани в залежності від полярності е.р.с. джерела і значень E , q , R , и R_d .

2.2 Характеризуючі енергетичні показники системи електротягова мережа - ЕРС

Якість електроспоживання в електротяговій мережі залежить від технічних характеристик і енергоефективності перетворення електроенергії в механічну енергію руху ЕРС, від схеми живлення і інших параметрів електротягової мережі. Мережа включає енергетичні ланки тягових підстанцій, контактної і зворотного тягової мережі. Якість електроспоживання також залежить від організації руху з реальним профілем колії і факторів зовнішнього середовища.

Надійність, енергетична ефективність і безпека даної енергетичної системи електричної тяги визначається показниками якості електроспоживання.

Основними показниками які характеризують якість мереж електротяги є:

- рівні напруги у струмоприймачів ЕРС і на шинах тягових підстанцій;
- синусоїдальність форми струму кривих струму і напруги;
- завантаження електричних мереж неактивною складовою переданих

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужностей електроенергії;

- втрати електроенергії в струмоведучих елементах електричних мереж, а також значення споживаної електрорухомих складом потужності - в режимі тяги, і повернення її в мережу - в режимі рекуперативного гальмування.

2.2.1 Спектральний склад струму мережі живлення і випрямленої напруги на ЕРС

Крива випрямленої напруги при реалізації в ряд Фур'є містить постійну складову U_d і змінну складову, яка визначається сумою вищих гармонійних складових:

$$u_d = U_d + \sum U_{dm(n)} \sin(n\omega t + \varphi(n)), \quad (2.12)$$

де n – порядковий номер вищої гармонійної по відношенню до основної частоти живильної мережі 50 Гц;

q – кратність пульсації випрямленої напруги, для однофазних випрямлячів ЕРС $q = 2$; $k = 1, 2, 3, \dots$

Амплітуди вищих гармонійних для двухпульсових схем в ланці випрямленої напруги ЕРС:

$$U_{dm(n)} = \frac{2 \cdot E_{2m}}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\alpha \cdot \frac{2}{n^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + n^2 - q^2 \cdot \alpha}, \quad (2.13)$$

де α - кут управління випрямлячем.

З виразу (2.13) випливає наступне, що гармонійний склад випрямленої напруги залежить від пульсацій за період $T = 2\pi\omega$, де $\omega = 2\pi f$ визначається частотою контактної мережі 50 Гц:

$$f(n) = kqf, \quad (2.14)$$

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $f = 50$ Гц, $q = 2$; $k = 1, 2, 3 \dots$

Коефіцієнт гармонійної складової [7]:

$$k_{U(n)} = \frac{U_{m(n)}}{U_{m(1)}} \cdot 100 \% , \quad (2.15)$$

сумарний коефіцієнт гармонійних складових:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \% , \quad (2.16)$$

коефіцієнт спотворення по напрузі визначається виразом:

$$k_{EU} = \frac{U_{(1)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}} \cdot 100 . \quad (2.17)$$

Якість випрямленої напруги характеризується коефіцієнтом хвилястості:

$$k_{\omega} = \frac{U_d}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=k \cdot q}^{\infty} \left[\frac{U_{dm(n)}}{\sqrt{2}} \right]^2}}{U_{d0}} , \quad (2.18)$$

де U_d - ефективне значення змінної складової випрямленої напруги;

U_{d0} - середнє значення випрямленої напруги.

Застосовується також інший коефіцієнт оцінки випрямленої напруги -

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт пульсації [6]:

$$k_q = \frac{U_{dm(n)}}{U_{d0}}, \quad (2.19)$$

де $U_{dm(n)}$ - амплітуда найбільшої (старшої) гармонійної складової, для $q = 2$, $n = 2$.

В табл. 2.1 наведені ефективні значення вищих гармонійних складових випрямленої напруги в процентах від середнього значення випрямленої напруги, для $q = 2$, $k_\omega = 2$.

Таблиця 2.1 – Ефективні значення вищих гармонійних складових випрямленої напруги

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
$U_d(n)/U_{d0}$, %	41	-	9	-	4	-	2	-	1,4	-	1	-	0,7	-	0,6	-	0,4	-	0,3	-	0,3	-	0,3	-
$I_{m(1)}/n$, %	-	33	-	20	-	14	-	11	-	9	-	8	-	7	-	6	-	5	-	5	-	4	-	4

Де n – номер вищої гармонійної; $f(n)$ – частота; $U_d(n)/U_{d0}$ – вміст вищих гармонійних напруги, $I_{m(1)}/n$ – вміст вищих гармонійних струму мережі.

Крива струму первинної обмотки тягового трансформатора ЕРС i_1 (струму споживаного з мережі) від типу вхідного перетворювача і характеру тягового навантаження. Форма кривої струму несинусоїдальна. Крива первинного струму i_1 містить основну гармоніку $i_{1(1)}$ з частотою мережі 50 Гц і деякий спектр вищих гармонійних складових. При розкладанні кривої струму i_1 в ряд Фур'є отримано, що в ній відсутня постійна складова і косинусні складові, а в синусної складової є тільки непарні гармонійні складові. Для ідеальної кривої випрямленого струму

амплітуди гармонійних складових:

$$I_{Im(1)} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \frac{I_d}{k_T} \cdot \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2I_d}{k_T \cdot \pi \cdot n} \cdot [1 - (1)^n], \quad (2.20)$$

де k_T – коефіцієнт трансформації тягового трансформатора.

З виразу (2.20) випливає, що в кривій струму i_I крім першої гармоніки міститься ряд вищих непарних гармонійних, старша ($n = 3$) та наступне ($n = 5, 7, 9, \dots$) тобто $n = 2k \pm 1$.

Амплітуди вищих гармонійних обернено пропорційні їх порядковому номеру:

$$I_{Im(n)} = \frac{I_{Im(1)}}{n} \quad . \quad (2.21)$$

У табл. 2.1 наведено вміст вищих гармонійних струму мережі $i_{1(1)}$ (ефективне значення).

Ефективне значення струму первинної обмотки тягового трансформатора (мережі):

$$I_I = \sqrt{[I_{I(1)}]^2 + \sum_{n=1}^{\infty} [I_{I(n)}]^2} = I_{I(1)} \cdot \sqrt{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}} \quad . \quad (2.22)$$

Наявність вищих гармонійних складових призводить до зростання ефективного струму в мережі живлення, що викликає додаткові втрати енергії в живильній системі. Відношення корисної (основної) гармонійної складової струму до його повного (ефективного) струму оцінюється коефіцієнтом спотворення струму:

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$k_{III} = \frac{I_{I(I)}}{I_I} . \quad (2.23)$$

Для двопульсових схем ($q=2$) $k_{III} = 0,9$.

Вміст вищих гармонійних в реальній кривій первинного струму при обліку кутів комутації γ та управління α , відрізняються від наведених вище значень. Загальна закономірність полягає в тому, що при ідеальному згладжуванні струму I_d зі збільшенням кута комутації γ , значення вищих гармонійних знижується, а збільшення кута управління α призводить до зростання амплітуди вищих гармонійних.

2.2.2 Спектральний склад напруги в електротяговій мережі

Так як на інтервалі комутації γ існує коротке замикання в мережі, то напруга на затискачах вхідного перетворювача визначається відношенням індуктивностей живильної системи і тягового трансформатору. При цьому слід застосовувати індуктивні опори, приведені до напруги живильної системи:

$$L_T = L_{S1} + k^2 L_{S2}. \quad (2.24)$$

З цього випливає загальна закономірність, яка визначає характеристику спотворення кривої напруги в електротяговій мережі: чим менше індуктивний опір мережі живлення, тим менше спотворення кривої напруги.

Відношення потужності $P_d = I_d U_d$ до потужності короткого замикання мережі S_c , включаючи мережу електротяги та мережу зовнішнього електропостачання, характеризує ступінь спотворення.

На рис. 2.2 приведена схема заміщення і графік напруги живильної мережі з урахуванням комутації випрямленого і фазового управління.

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

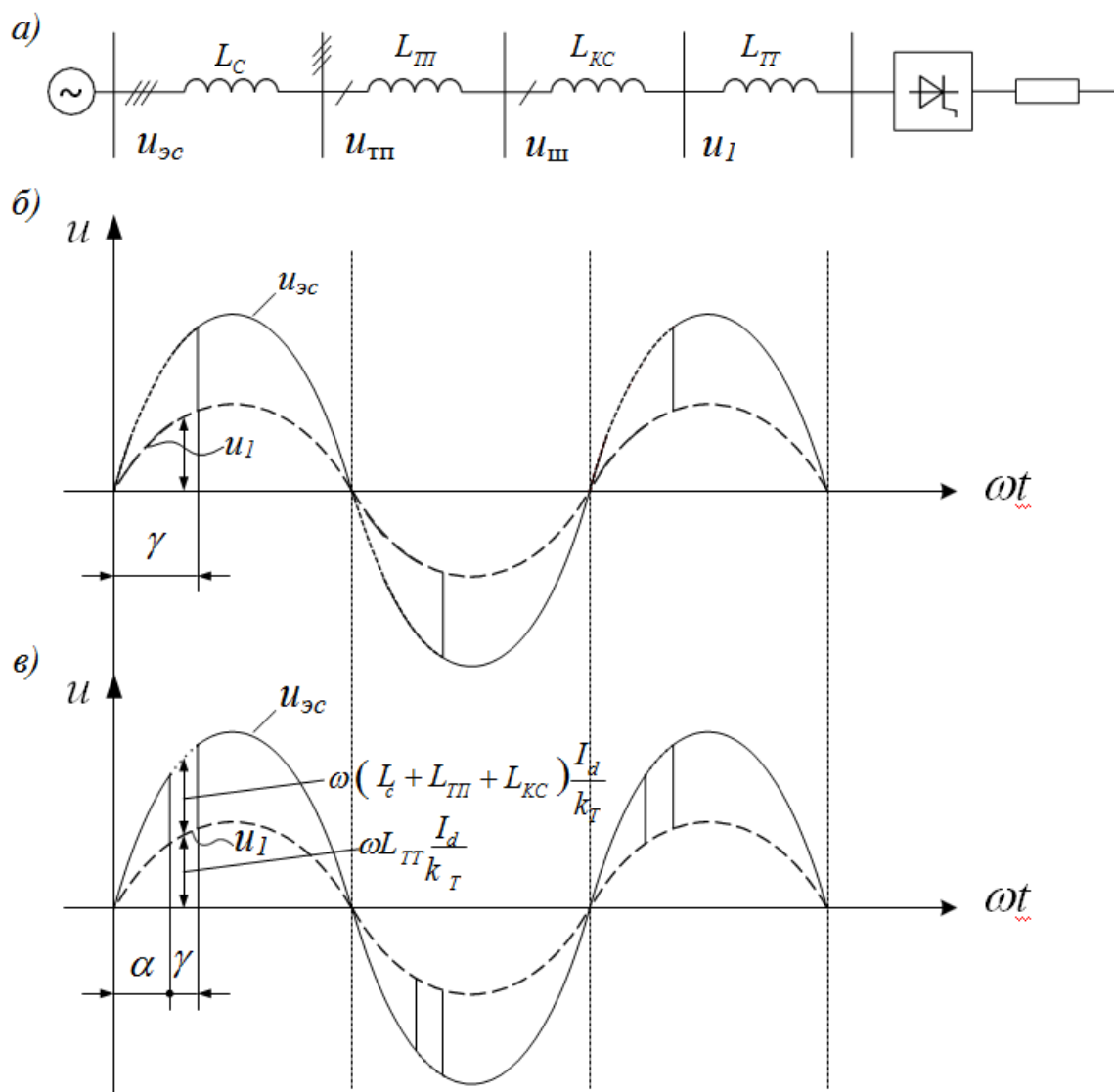


Рисунок 2.2 – Формування кривої напруги тягової мережі з урахуванням комутації і фазового управління випрямлячем: схема заміщення (а), вплив кута комутації (б) і спільний вплив кута управління і кута комутації (в)

Внаслідок спотворення напруги на струмоприймачі ЕРС в його складі з'являються вищі гармонійні $U_{I(n)}$. Ступінь спотворення характеризується коефіцієнтом гармоніки:

$$k_{IU} = \frac{\sum_{(n>1)} [U_{I(n)}]^2}{U_I} \quad , \quad (2.25)$$

де U_I – ефективне значення напруги тягової мережі.

При аналізі якості електроспоживання [8] використовуються так само коефіцієнт спотворення напруги k_{IU} , який визначається аналогічно коефіцієнту спотворення k_{UI} . Відповідно до міжнародних норм окремі вищі гармонійні складові ($n < 13$) не повинні перевищувати 5%, а коефіцієнт спотворення кривої напруги живлення не повинен бути нижче 0,995 [1]. При цьому коефіцієнт гармонік напруги повинен бути не вище 10%.

2.2.3 Реактивна потужність в електротяговій мережі

Повна, активна і реактивна потужності в електротяговій мережі при синусоїдальній потужності в електротяговій мережі при синусоїдальній напрузі відповідно рівні:

$$S = UI; \quad P = UI \cos \varphi \quad Q = UI \sin \varphi; \quad (2.26)$$

де U, I – ефективні значення відповідно напруги і струму мережі;

φ – фазовий кут зсуву між кривими напруги і струму.

Відношення $P/S = \cos \varphi$ називається коефіцієнтом активної потужності або коефіцієнтом зсуву струму і напруги.

Миттєва потужність:

$$p(\omega t) = u \cdot i = UI (\cos \varphi - \cos (2\omega t - t)) , \quad (2.27)$$

пульсує з подвійною частотою відносно середнього значення $UI \cos \varphi$. В режимах роботи вхідного перетворювача ЕРС однофазного змінного струму внаслідок несинусоїдальності струму дані співвідношення потужності неточно відображають реальні процеси (рис 2.3).

У такому режимі крива миттєвої потужності відрізняється від синусоїдальної форми. З цієї кривої можна виділити синусоїдальну складову. Друга складова кривої повної потужності визначає внесок вищих гармонійних струму в спотворення форми кривої потужності.

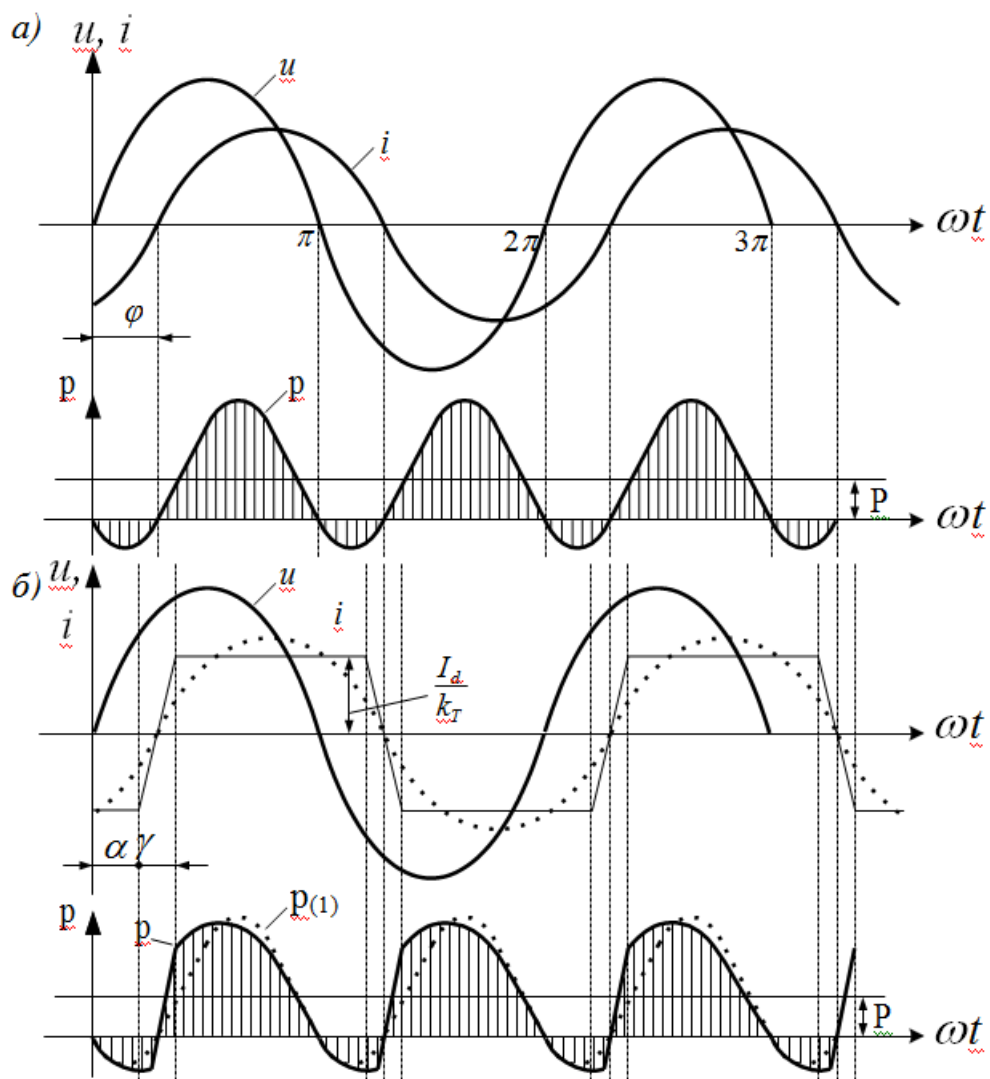


Рисунок 2.3 – Діаграми струмів, потужностей і мережі живлення при синусоїдальній формі струму (а) і при спотвореній (несинусоїдній) формі струму (б)

При допущенні синусоїдальності напруги повна потужність вхідного перетворювача матиме вигляд:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = U_1 \cdot \sqrt{[I_{1(1)}]^2 + \sum_{(n>1)} [I_{1(n)}]^2}, \quad (2.28)$$

де U_1 , I_1 – відповідно ефективні значення первинної гармонійної напруги і струму.

З урахуванням спотворення кривої напруги повна потужність визначається наступним виразом:

$$S_I = U_I \cdot I_I = \sqrt{[U_{I(1)}]^2 + \sum_{(n>1)} [U_{I(n)}]^2} \cdot \sqrt{[I_{I(1)}]^2 + \sum_{(n>1)} [I_{I(n)}]^2}. \quad (2.29)$$

Активна потужність визначається основною гармонійною складовою струму і напруги:

при допущенні синусоїдальності напруги:

$$P_1 = P_{1(1)} = U_1 I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}, \quad (2.30)$$

при обліку несинусоїдальності струму та напруги:

$$P_1 = P_{1(1)} = U_{1(1)} I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}. \quad (2.31)$$

Неактивна потужність Q_1 складається з двох складових: реактивної потужності основної гармонічної складової:

$$Q_{1(1)} = U_{1(1)} I_{1(1)} \sin \varphi_{(1)}, \quad (2.32)$$

і потужності спотворення, що залежить від вищих гармонійних струму і напруги, при допущенні синусоїдальності напруги:

$$D = U_I \sqrt{\sum_{(n>1)} [I_{I(n)}]^2}, \quad (2.33)$$

при обліку несинусоїдальності струму і напруги:

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$D = \sqrt{\frac{1}{2T} \cdot \int_0^T \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [u_{(m)}(t) \cdot i_{(n)}(t) - u_{(n)}(t) \cdot i_{(m)}(t)] dt} , \quad (2.34)$$

де T – період основною гармонійної складової.

Проблема спотворень, що розглядається в теорії енергетичних процесів, тісно пов'язана з проблемою підвищення ефективності роботи всієї електричної системи. Існуючий стан теорії електричних систем є досить суперечливий. З одного боку, розроблені і широко застосовуються методи розрахунку спотворень струму і напруги. З іншого боку, єдиних методів енергетичних розрахунків енергії і потужності по заданих несинусоїдальний струмів і напруг, не створено й досі.

Цей стан теорії відбився на Міжнародних стандартах МЕК для несинусоїдальних струмів і напруг. У цих стандартах дано визначення тільки середньої складової активної потужності і уявної потужності.

Вирішенню цієї проблеми присвячені праці великих колективів вчених і фахівців вітчизняних електроенергетиків В.Ф. Миткевича, Л.Р. Неймана, К.С. Демірчана, В.Т Черемисина, К.А. Кола, А.В. Поссе, В.А. Лабунцова, і інших, учених зарубіжжя Neumann F., Budenau C., Depenbrock M.

Використовуючи основні властивості періодичних функцій, одержувані при ортогональних розкладах, приймемо для порівняльних досліджень різних перетворювальних приймачів електричної енергії одну з моделей розкладання повної потужності на складові, наведену на рис. 2.4.

Зазначені складові потужності запропоновано пояснити графічною моделлю [5] у вигляді сукупності трикутників потужностей для основної гармонійної складової і додатковим трикутником спотворення.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

прийнято називати потужностями комутації і фазового управління [1].

2.3 Аналіз енергетичної взаємодії з електротяговою мережею імпульсного перетворювача однофазно-постійного струму модуляційного типу

Принцип дії і основні співвідношення, що характеризують роботу перетворювача розглянемо за допомогою схеми (рис. 2.5) Силкові транзистори VS1 - VS4 і діоди VD1 - VD4 утворюють схему імпульсного реверсивного перетворювача однофазно-постійного струму модуляційного типу (чотириквдратний перетворювач), підключеного до джерела змінної напруги e_c через дросель L_c . Індуктивність L_c сприймає різницю напруг e_c і u_l на вході перетворювача. У ланцюг постійного струму включені джерело постійної напруги E_d і конденсатор фільтру C_d , призначений для шунтування вищих гармонік струму навантаження i_d . Підключення конденсатора C_d великої місткості до джерела E_d надає йому властивості джерела напруги [9].

Транзистори VS1 - VS4 і зустрічно-паралельно включені зворотні діоди VD1 - VD4 утворюють ключові елементи схеми, що володіють двосторонньою провідністю.

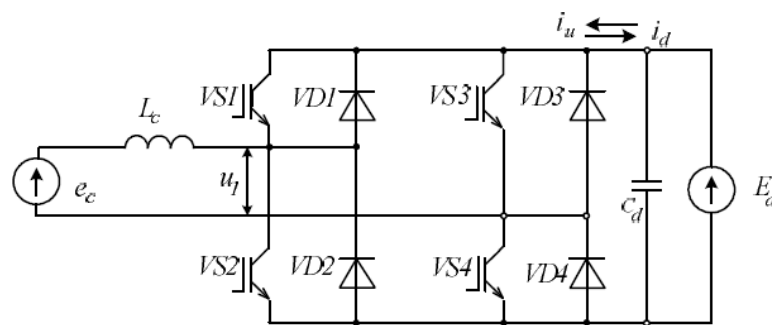


Рисунок 2.5 – Схема включення імпульсного чотириквдратного перетворювача модуляційного типу (4q-S)

Схема чотириквдратного перетворювача являє собою два зустрічно включених мостових випрямлячів - керованого VS1 - VS4 і некерованого VD1 - VD4, з'єднаних з боку затискачів постійної напруги. До зажимів змінної напруги через індуктивність L_c підключено вхідне джерело змінної напруги e_c , а

навантаження у вигляді джерела ЕРС E_d і конденсатора C_d включено між анодною і катодною групами некерованого випрямляча VD1 - VD4. Принцип роботи перетворювача передбачає включення індуктивності L_c в ланцюг джерела e_c .

Чотириквдратний перетворювач може працювати в режимах випрямлення, інвертування і тактування і їх поєднанні. В режимі випрямлення (рис. 2.6) струм в ланцюзі $i_c = i_d$ протікає в один напівперіод через зворотні діоди VD1, VD4, а в інший - через VD2 і VD3. Оскільки струм $i_c = i_d$ збігається з напругою вхідного джерела e_c , він є джерелом електричної енергії. Її споживачем стає ланцюг постійної напруги E_d , оскільки напрямок струму i_d протилежний напрузі джерела E_d .

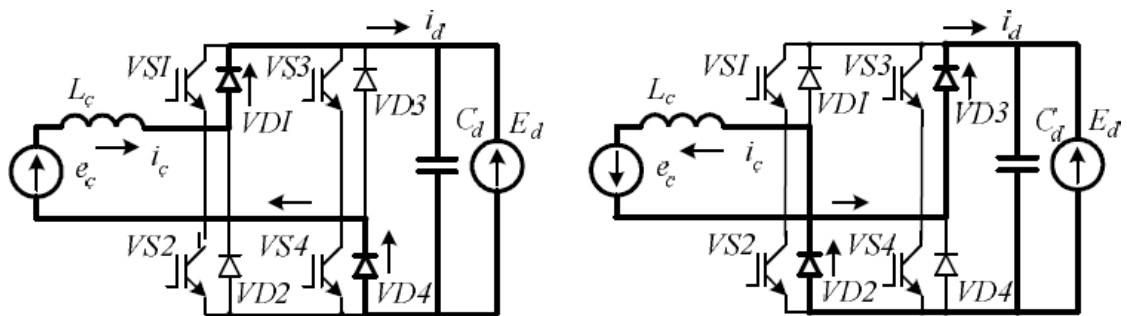


Рисунок 2.6 – Випрямний режим роботи

Рекуперация енергії від джерела E_d (режим інвертування) здійснюється шляхом включення пари транзисторів VS1, VS4 (VS2, VS3) різних груп перетворювача (рис. 2.7).

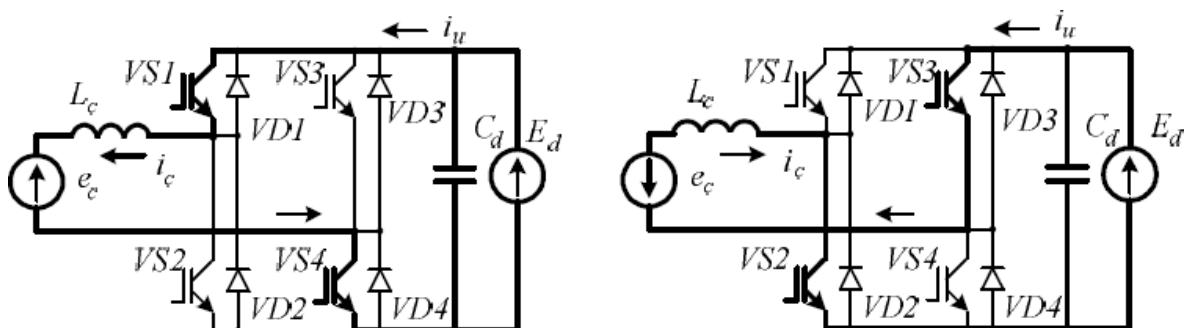


Рисунок 2.7 – Інверторний режим роботи

В цьому випадку в перетворювачі протікає струм $i_u = i_c$, який співпадає E_d та спрямований зустрічно напрузі e_c що вказує на режим генерування енергії джерелом E_d і її споживанням ланцюгом вхідного джерела e_c . Для реалізації цього режиму напруга E_d на виході перетворювача має вказувати на режим генерування енергії джерелом E_d і її споживанням ланцюгом вхідного джерела e_c . Для реалізації цього режиму напруга E_d на виході перетворювача має бути більше амплітудного значення напруги джерела живлення, $E_d > 2e_c$. З цієї умови випливає, що перетворювач не може регулювати вихідну напругу нижче амплітудного значення джерела живлення e_c .

Режим тактування характеризується включенням одного з транзисторів перетворювача. У цьому випадку вхід перетворювача з'єднаний відкритим транзистором одного і зворотним діодом іншого плеча моста. Наприклад, при полярності e_c , указаний на рис. 2.8, струм i_c може протікати через VS1, VS3 або VS2, VS4. У цьому режимі відбувається запасання магнітної енергії в індуктивності L_c ; вихідна ланцюг з джерелом E_d відключена від перетворювача закритими транзисторами VS2, VS4 (VS1, VS3).

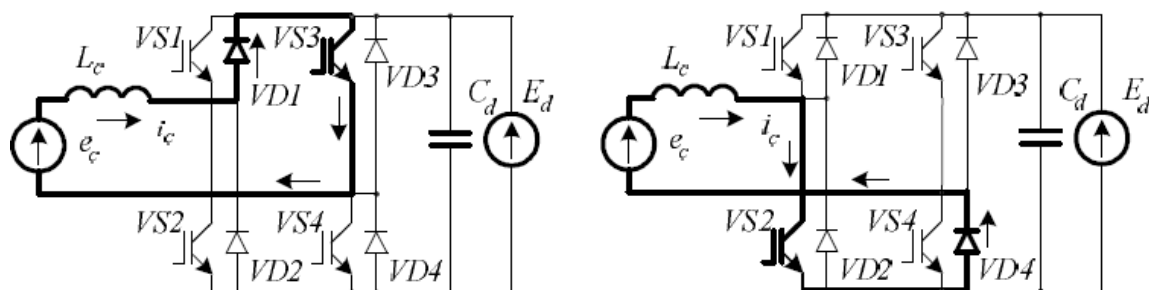


Рисунок 2.8 – Режим тактування

Включення і вимикання транзисторів VS1-VS4 перетворювача здійснюється за алгоритмом, що забезпечує широтно-імпульсну модуляцію напруги за синусоїдальним законом. Керуюча напруга для VS1-VS4 формується системою управління шляхом порівняння двох модульованих напруг u_{m1} , u_{m2} ($u_{m2} = -u_{m1}$) і сигналу генератора пилоподібної напруги $u_{гпн}$ (рис. 2.9). Частота генератора $f_{гпн} = kf_c$ повинна бути кратна непарній частоті f_c вхідного джерела e_c .

На рис. 2.9 показані діаграми напруг і струмів, що відносяться до роботи 4q-S перетворювача з $k = 5$.

Імпульси управління транзисторами VS1-VS4 формуються в моменти рівності напруг $u_m = -u_m$ і $u_{гпн}$, їм відповідають такі логічні функції [9]

$$\begin{aligned} VS1 &= \begin{cases} 1 & \text{при } u_{m1} - u_{гпн} \geq 0 \\ 0 & \text{при } u_{m1} - u_{гпн} \leq 0 \end{cases} \\ VS3 &= \begin{cases} 1 & \text{при } u_{m2} - u_{гпн} \geq 0 \\ 0 & \text{при } u_{m2} - u_{гпн} \leq 0 \end{cases}, \\ VS2 &= \overline{VS1} \quad VS4 = \overline{VS3}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Логічна одиниця "LOG 1" відповідає провідному стану транзистора, а 0 - закритому. Символ інверсії означає протилежний стан елементів VS1 і VS2 (VS3, VS4). При включенні діагональних транзисторів VS1 і VS4 (VS2, VS3), відповідно до рисунка 2.9 формується напруга u_1 на затисках змінного струму перетворювача з амплітудою E_d і регульоване по закону модулюючої напруги u_m . Фаза першої гармоніки цієї напруги u_{11} залежить від фазового кута зрушення модулюючої напруги u_m щодо напруги джерела e_c . В цьому випадку при зустрічному включенні джерел e_c і $u_m = E_d$, струм i_c у вхідному ланцюзі перетворювача визначається рівнянням:

$$L_c = \frac{di_c}{dt} = e_c - u_1. \quad (2.37)$$

При включенні суміжних елементів (VS1, VS3 або VS2, VS4) утворюється контур протікання струму через зворотний клапан і транзистор перетворювача.

Цей інтервал роботи перетворювача відповідає режиму тактування (див. рис. 2.8). Джерело E_d відключене від перетворювача закритими транзисторами VS1, VS3 (VS2, VS4), тому напруга на затискачах змінного струму u_1 , а також струм навантаження i_d дорівнюють нулю. Вхідний струм перетворювача i_c

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмежений індуктивністю L_c , при $u_1 = 0$ він визначається рівнянням:

$$L_c = \frac{di_c}{dt} = e_c \quad (2.38)$$

При $L_c \cdot di_c / dt > 0$ відбувається зростання струму i_c і запасання енергії в індуктивності L_c .

З рис. 2.9 слідує, що вхідний струм i_c має вигляд ламаної лінії, що складається з ділянок наростання і спадання. Ступінь згладжування струму визначається індуктивністю L_c вхідного джерела, а також частотою пилоподібної напруги $u_{\text{ГПН}}$. Збільшення цих значень робить струм i_c більш плавним і наближеним до синусоїдальної форми.

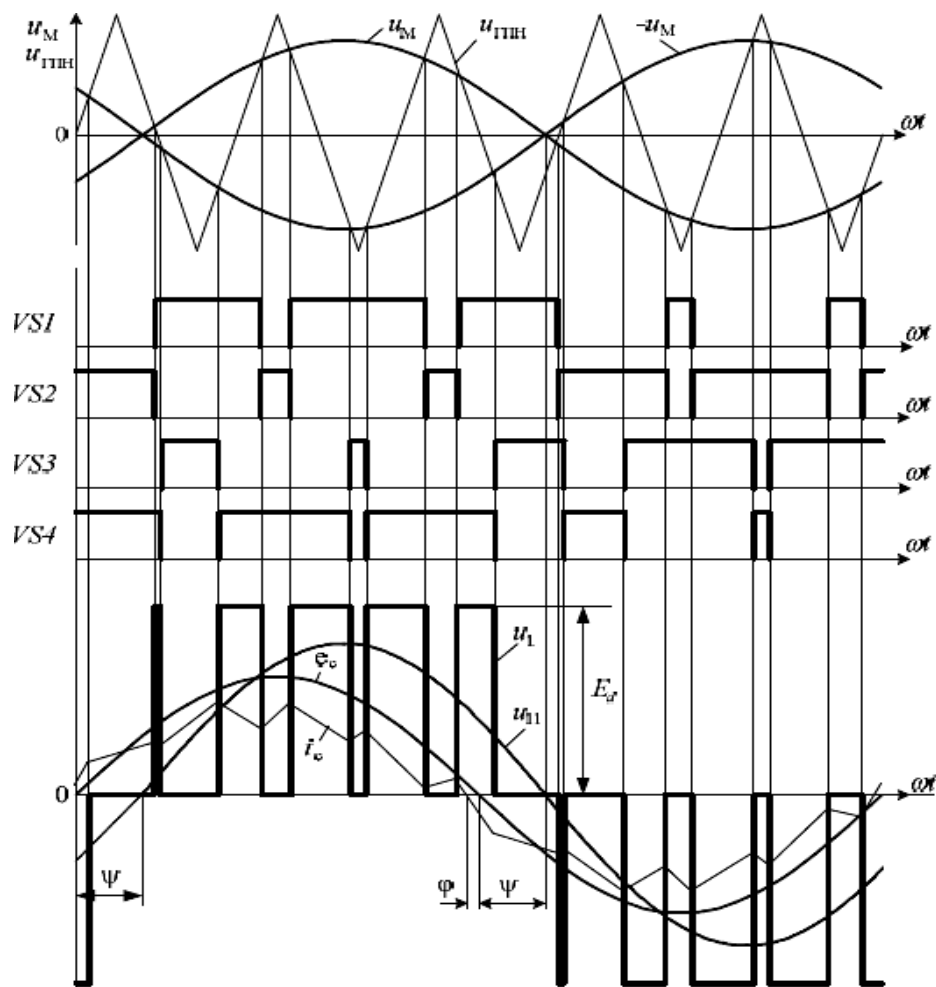


Рисунок 2.9 – Діаграми роботи чотирьохкватратного перетворювача

Струм в ланцюзі навантаження протікає в випрямному і інверторному режимах роботи перетворювача, коли джерело E_d через відкриті транзистори VS1, VS4 або VS2, VS3 підключається до джерела вхідної змінної напруги e_c . Тривалість протікання струму навантаження визначається інтервалами спільної роботи транзисторів VS1, VS4 і VS2, VS3.

Режим роботи 4q-S перетворювача (випрямлення або інвертування) визначається кутом зсуву ψ між мережевою напругою e_c і першою гармонікою напруги u_{11} . Зміна фази у напруги u_{11} здійснюється шляхом зміни фази напруги, що модулює u_m ($-u_m$) щодо напруги e_c .

На рисунках 2.10, а, б і 2.11, а, б наведені діаграми струмів і напруг 4q-S перетворювача, отримані в результаті математичного моделювання, які відносяться до режиму випрямлення і інвертування, відповідно кут ψ в обох випадках становить 20 ел.град. У випрямному режимі фаза першої гармоніки напруги u_{11} відстає від напруги мережі e_c на кут ψ (рис 2.10, а). А в цьому випадку постійна складова I_d струму в ланцюзі (рис. 2.10, б) спрямована зустрічно напрузі джерела E_d , що вказує на споживання ним енергії від вхідного джерела e_c , тобто відповідає випрямному режиму роботи перетворювача.

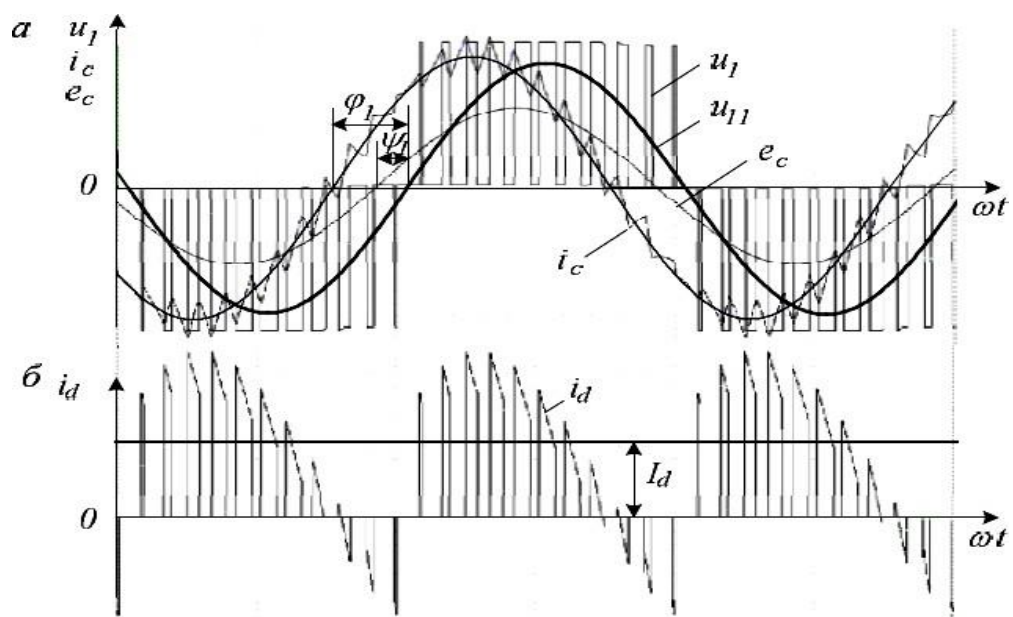


Рисунок 2.10 – Діаграми роботи перетворювача в випрямному стані

Для переводу 4q-S перетворювача в інверторний режим роботи необхідно змінити фазу ψ напруги u_{11} зробити її випереджаючою по відношенню до напруги e_c (рис. 2.11, а). У цьому полягає можливість переведення перетворювача з режиму випрямлення в режим інвертування тільки за рахунок зміни фази ψ модулюючої напруги u_m . Середнє значення струму навантаження I_d (рис. 2.11, а) стає негативним, що відповідає зміні напрямку струму, тобто струм i_u протікає від джерела E_d у вхідні ланцюг перетворювача. Збіг знаків середнього значення струму I_u напруги E_d вказує на джерело E_d як джерело енергії, а режим роботи інвертора відповідає інвертуванню (рекуперації) енергії.

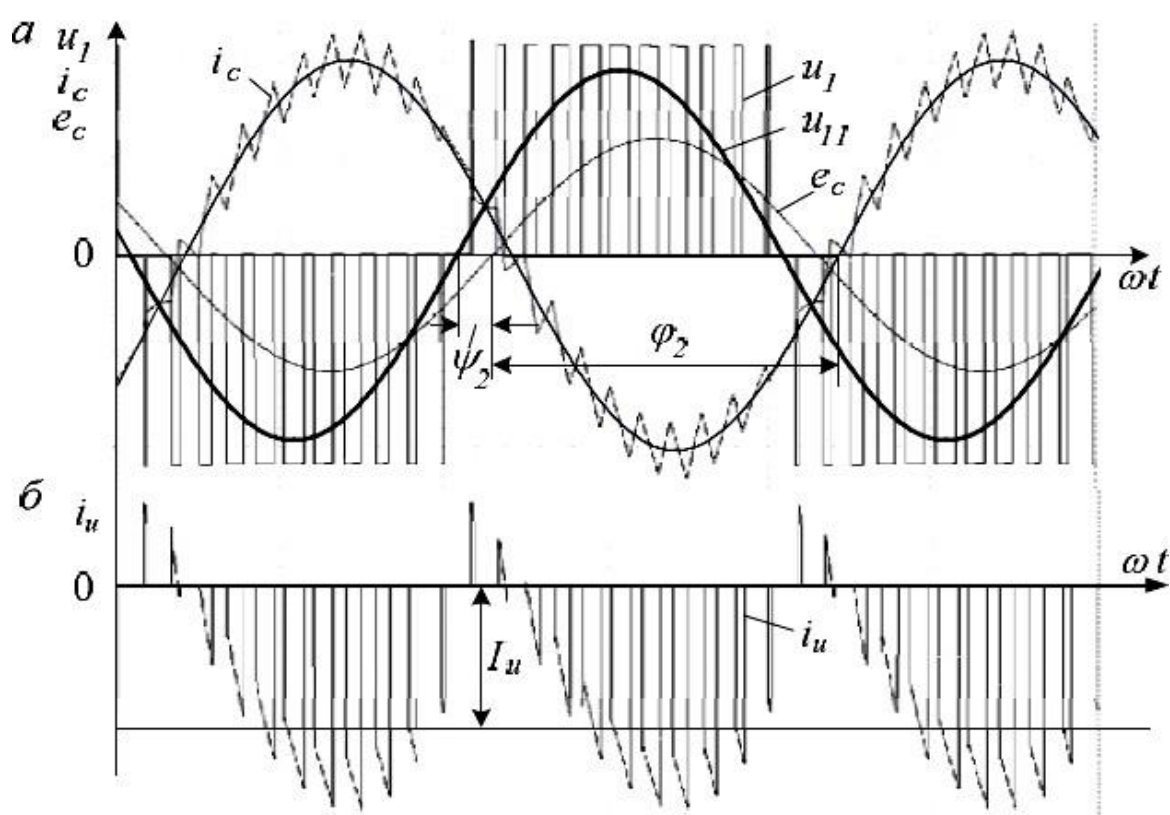


Рисунок 2.11 – Діаграми роботи перетворювача в інверторному режимі

З рисунка 2.10 випливає, що в випрямному режимі змінний вхідний струм i_c перетворюється в випрямлений струм i_d ланцюга навантаження. У режимі інвертування змінна напруга u_1 на виході перетворювача формується з постійної напруги навантаження E_d методом ШІМ. Слід зазначити, що випрямлення напруги мережі e_c за допомогою діодів VD1 - VD4 не представляється можливим,

оскільки, як встановлено вище, напруга E_d на вході перетворювача перевищує вхідну напругу e_c . Таким чином, 4q-S перетворювач слід розглядати як випрямляч змінного струму i_c , або як інвертор постійної напруги E_d .

Змінна складова струму навантаження замикається через ланцюг конденсатора фільтра C_d . З рисунків 2.10, 2.11 слідує, що за період селевої напруги відбувається дві пульсації струму $i_d(i_u)$ з частотою $2f_c$, тому для зменшення цієї складової струму до затискачів кола постійного струму перетворювача підключають резонансний LC-фільтр, налаштований на частоту $2f_c$.

Розглянемо основні співвідношення, що характеризують роботу 4q-S перетворювача. Приймаємо синусоїдальну напругу джерела змінної напруги e_c з нульовою початковою фазою:

$$E_c = E_{cm} \sin \omega t. \quad (2.39)$$

Перша гармоніка напруги $u_{1(1)}$ на затискачах змінного струму перетворювача в загальному випадку має фазовий зсув ψ щодо e_c і визначається виразом:

$$u_{1(1)} = U_{1(1)m} \sin(\omega_c t - \psi), \quad (2.40)$$

де $u_{1(1)} = \mu E_d$ - амплітудне значення гармоніки;

ψ - фазовий кут зсуву.

З рис. 2.9 випливає, що фаза першої гармоніки напруги $u_{1(1)}$, що збігається з напівперіодами напруги u_1 , визначається фазою напруги, що модулює u_m .

Перша гармоніка струму мережі $i_{c(1)}$ інвертора в загальному випадку має деякий кут φ щодо напруги e_c і визначається виразом:

$$i_{c1} = I_{cm} \sin(\omega t - \varphi), \quad (2.41)$$

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де I_{cm} - амплітуда струму мережі.

У випрямному режимі напруга $U_{1(1)M}$ відстає на деякий кут φ_1 від напруги E_{cm} , а їх різниця ΔU прикладається до індуктивності L_c . В цьому випадку вхідний ланцюг визначається співвідношенням.

$$\Delta U = E_1 - U_{1(1)i}; u_{1(1)} = j\omega_c L_c I_{c1} \quad (2.42)$$

Таким чином, 4q-S перетворювач є реверсивним перетворювачем, що дозволяє здійснювати передачу електричної енергії як в ланцюг постійного струму, так і назад в мережу живлення. При цьому у вхідному ланцюзі можна забезпечити нульовий фазовий зсув між споживаним струмом і мережевою напругою в режимі випрямлення і протифазний напрямок струму в режимі інвертування (рекуперації). Мережевий струм має синусоїдальну форму, що визначає високі енергетичні показники цього перетворювача.

На рис. 2.12 представлений аналіз схеми імпульсного чотириквдратного перетворювача [10]. Структурна схема такого перетворювача зображена на рис. 2.12, б. На ній позначена: $X_{\pm}$ - вхідна логічна змінна - струм $i_1 = i_2$, Y -вихідна логічна змінна, i - струм, F_{Tj} , F_{Dj} - відповідно, вихідні змінні логічних елементів - транзисторів VT1 ... VT4 і діодів VD1 ... VD4.

Чотириквдратний перетворювач виконує дві функції: модуляції і поляризації, що проводить напрямки транзисторного комутатора. При цьому функція зміни полярності включає випрямлення і пропуск зворотного струму. Модуляція реалізується періодичним перемиканням схеми (рис. 2.12, а) зі стану, коли струм мережі визначається ланцюгом постійної напруги ($i_1 = i_m = i$) і постійна напруга визначається напругою на вторинній стороні трансформатора ($u_2 = \pm E$), в стан, коли струм мережі визначається коротким замиканням живильного ланцюга через тиристири перетворювача ($i_m = I = 0$) і напруга на вході відсутня.

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

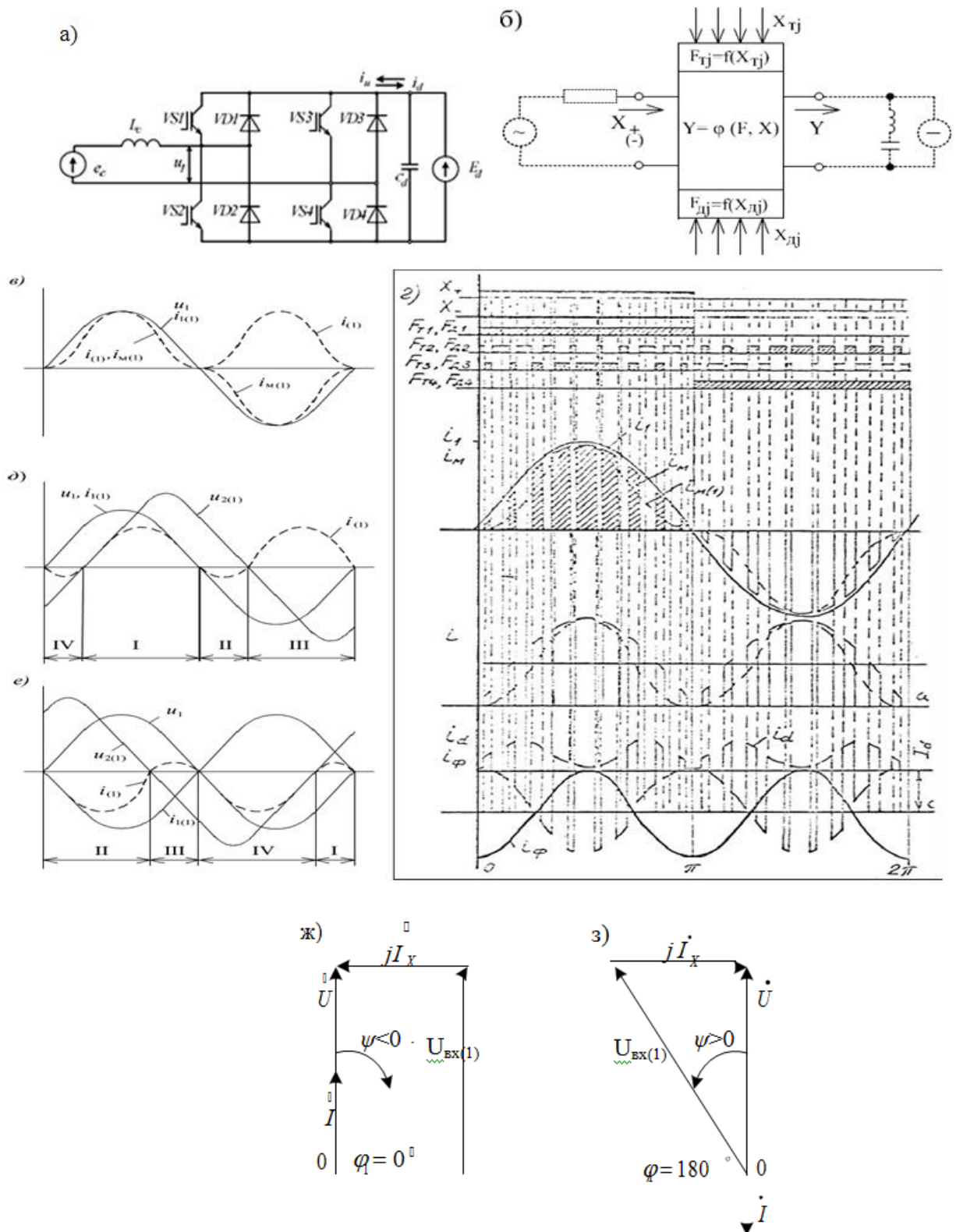


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема заміщення (а), структурна схема (б), діаграми станів (в, г, д, е) і векторні діаграми випрямних і інверторних режимів (ж, з) імпульсного чотириквдратного перетворювача

Поляризація можливою завдяки тому, що завдяки двосторонній провідності плечей і в залежності від провідного стану певних транзисторів струм мережі протікає зустрічно, або згідно з полярністю, яка визначається ланцюгом постійного струму ($i_1 = \pm i$) або постійна напруга по відношенню до сторони змінної напруги падає з позитивним або негативним знаком ($E = \pm u_2$). При цьому напруга, сприймається дроселем L_c , приймає три різні значення:

Алгоритм перемикання плечей перетворювача визначається з умови, при якому основна гармонійна струму підпорядковується закону (рис. 2.12, в):

$$i_{m(1)} = I_{m(1)} \sin \omega t \cdot \sin \omega t = \begin{cases} I_{m(1)} \sin^2 \omega t & \text{при } i_1 > 0 \\ -I_{m(1)} \sin^2 \omega t & \text{при } i_1 < 0 \end{cases}, \quad (2.43)$$

основна гармонійна випрямленого струму відповідно

$$i_{m(1)} = |i_m| = I_{m(1)} \sin^2 \omega t = \frac{I_{m(1)}}{2} (1 - \cos 2\omega t). \quad (2.44)$$

Друга складова i_ϕ струму і замикається через відсмоктуючий контур (L_ϕ , C_ϕ), а постійна складова I_d визначається навантаженням. Через падіння напруги на індуктивному опорі дроселя L основна гармонійна напруги не збігається з напругою мережі u_1 на кут ψ (див. рис. 2.12, д, ж), тобто

$$u_{(1)2} = U_{i2(1)} \sin(\omega t - \psi).$$

При модуляції по закону синуса

$$U_{i2(1)} = k_{C_{\max}} \cdot E.$$

Векторні діаграми для перших гармонійних складових струму і напруги за

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

умови $\cos\varphi = 1$ показаний на рис. 2.12, ж, з відповідно для випрямного і інверторного режимів.

Тому діюче значення першої гармоніки вхідної напруги перетворювача визначається співвідношенням:

$$U_{(1)} = \sqrt{U_{(1)1}^2 + I_{(1)}^2 X^2} . \quad (2.45)$$

При синусоїдальній модуляції отримаємо:

$$U_{\text{вх}} = \frac{\mu U_d}{\sqrt{2}} . \quad (2.46)$$

Амплітуда вхідної напруги дорівнює U_d , підставивши у вираз (2.44) замість $U_{\text{вх}}$ з виразу (2.46) отримаємо:

$$\frac{\mu U_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{U_{(1)1}^2 + I_{(1)}^2 X^2} . \quad (2.47)$$

Введемо відносні одиниці:

$$U_{(1)}^* = \frac{U}{U_{\text{ном}}} ; ; I_{(1)}^* = \frac{I}{I_{\text{ном}}} ; ; U_d^* = \frac{U_d}{U_{\text{ном}}} ; ; I_K^* = \frac{I_K}{I_{\text{ном}}} ; , \quad (2.48)$$

$$\text{де } I_K = \frac{U_{\text{ном}}}{X_c}$$

При $\cos\varphi = 1$

$$P = UI ; ; P^* = \frac{U \cdot I}{P_{\text{ном}}} = \frac{P}{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}} ; . \quad (2.49)$$

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділимо (2.47) на $U_{ном}^2$

$$\frac{\mu U_d}{U_{ном}^2 \sqrt{2}} = \frac{1}{U_{ном}^2} \sqrt{U_{(1)1}^2 + I_{(1)}^2 X^2};$$

і після перетворень отримаємо:

$$\frac{\mu^*}{U_d} = \sqrt{2 \left(U_{(1)}^{*2} + \frac{P^{*2}}{I_K^{*2} U_{(1)}^{*2}} \right)}; \quad (2.50)$$

Доцільно забезпечити граничне значення глибини модуляції $\mu = 1$ з умови незмінності правій частині виразу (2.50) знаходимо необхідне значення відносного струму КЗ

$$I_K = \frac{U_{ном}}{X}$$

Тоді з умови:

$$\sqrt{2 \left(U_{max}^{*2} + \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{max}^{*2}} \right)} = \sqrt{2 \left(U_{min}^{*2} + \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{min}^{*2}} \right)};$$

прирівнявши вираження, отримаємо:

$$2 \left(U_{max}^{*2} + \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{max}^{*2}} \right) = 2 \left(U_{min}^{*2} + \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{min}^{*2}} \right).$$

Далі

$$U_{max}^{*2} - U_{min}^{*2} = \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{max}^{*2}} - \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{min}^{*2}},$$

$$U_{max}^{*2} - U_{min}^{*2} = \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2}} \left(\frac{U_{max}^{*2} - U_{min}^{*2}}{U_{max}^{*2} U_{min}^{*2}} \right). \quad (2.51)$$

Розділивши ліву і праву частини виразу (2.51), отримаємо:

$$1 = \frac{P_{max}^{*2}}{I_K^{*2} U_{max}^{*2} U_{min}^{*2}}.$$

Звідки:

$$I_K^{*2} = \frac{P_{max}^{*2}}{U_{max}^{*2} U_{min}^{*2}},$$

або

$$I_K^* = \frac{P_{max}^*}{U_{max}^* U_{min}^*}. \quad (2.52)$$

Далі, використовуючи вирази (2.50) і (2.52) отримаємо співвідношення для визначення U_d^* для вказаних вище граничних умов при $\mu = 1$.

$$U_d^* = \sqrt{2(U_{max}^{*2} + U_{min}^{*2})}. \quad (2.53)$$

З урахуванням виразу (2.51) знаходимо необхідну напругу КЗ:

$$u_K(\%) = \frac{100}{I_K^*},$$

$$u_K(\%) = \frac{100 \cdot U_{max}^* U_{min}^*}{P_{max}^*}. \quad (2.54)$$

Значення опору X визначається співвідношенням:

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_K^* \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} \cdot U_{\text{max}}^* U_{\text{min}}^*}{I_{\text{НОМ}} \cdot P_{\text{max}}^*} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} . \quad (2.55)$$

Використовуючи отримані співвідношення електричних параметрів, отримаємо вирази для визначення коефіцієнта модуляції μ і кута зсуву основної гармоніки ψ . Зі співвідношення (2.50) з урахуванням (2.52) і (2.53) отримано:

$$\mu = \sqrt{\left[\left(\frac{P}{P_{\text{max}}}\right)^2 \frac{U_{\text{max}}^* U_{\text{min}}^*}{U^{*2}} + U^{*2}\right] \frac{1}{U_{\text{max}}^{*2} + U_{\text{min}}^{*2}}} . \quad (2.56)$$

З векторної діаграми кут між векторами по абсолютній величині дорівнює:

$$|\psi| = \arctg\left(\frac{I \cdot X}{U}\right) = \arctg\left(\frac{P \cdot X}{U^2}\right) . \quad (2.57)$$

Або спростивши вираз з урахуванням виразу (2.52), отримаємо:

$$|\psi| = \arctg\left(\frac{P}{P_{\text{max}}}\right) \frac{U_{\text{max}}^* U_{\text{min}}^*}{U^{*2}} . \quad (2.58)$$

З аналізу векторних діаграм слідує, що чотириквдратний перетворювач дозволяє істотно поліпшити коефіцієнт потужності мережі і забезпечити високу ступінь згладжування пульсацій струму навантаження. Однак, як і всі регулятори струму, він не дозволяє в широкому діапазоні регулювати вихідну напругу. Тому застосування такого перетворювача виправдано в поєднанні з АІН з внутрішнім регулюванням напруги.

Аналіз стану перетворювача для теоретичного режиму $\varphi = 0$ наведено на рис. 2.13, г. Протягом одного періоду напруги живлення виділені чотири інтервали I ... IV, які відображають зони прямої і зворотної передачі потужності транзистором комутатором в позитивний і негативний напівперіод живлячої напруги.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

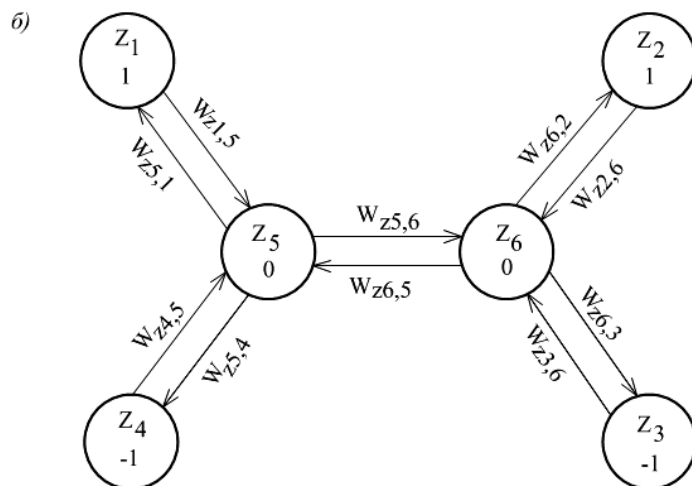
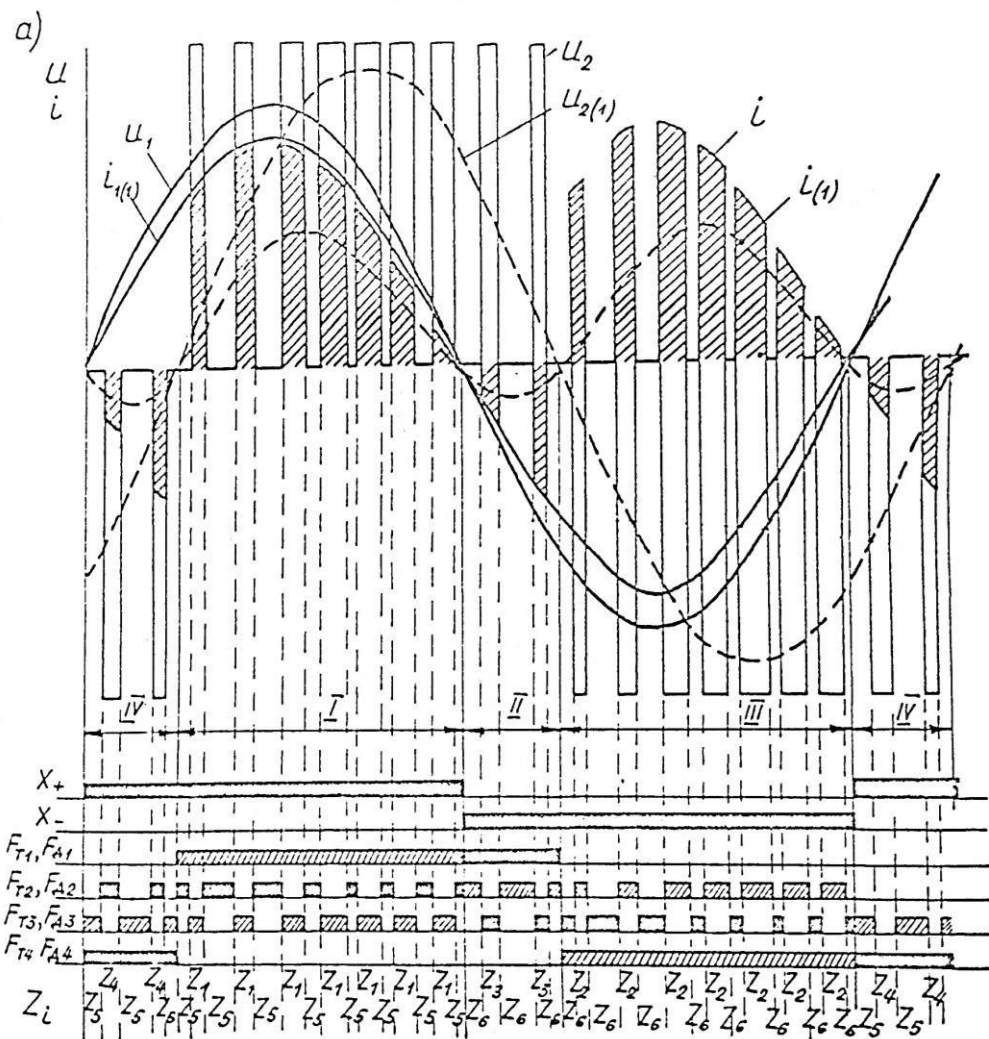


Рисунок 2.13 – Діаграми станів (а) і граф-схема алгоритму перемикань (б) імпульсного чотириквadrантного перетворювача.

У табл. 2.2 наведені набори функцій логічних елементів F_{Tj} (для транзисторів) и $F_{Дj}$ (для діодів) і відповідні їх стану комбінаційної схеми Z_i і значення функції виходів Y (струм i), отримані в результаті аналізу можливих станів для всіх чотирьох інтервалів [11].

Граф-схема алгоритму перемикань імпульсного чотириквдратного перетворювача приведена на рис. 2.13, б. Рух у просторі станів визначається траєкторією:

$$z_5 \rightarrow (z_1 \rightleftharpoons z_5)N_I \rightarrow z_6 \rightarrow (z_3 \rightleftharpoons z_6)N_{II} \rightarrow z_6 \rightarrow (z_2 \rightleftharpoons z_6)N_{III} \rightarrow z_5 \rightarrow (z_4 \rightleftharpoons z_5)N_{IV} \rightarrow z_5.$$

Таблиця 2.2 – Автоматна таблиця чотириквдратного імпульсного ВІП

Виходи логічних елементів								Вхід схеми		Вихід схеми	Стан схеми
F_{T1}	F_{T2}	F_{T3}	F_{T4}	$F_{Д1}$	$F_{Д2}$	$F_{Д3}$	$F_{Д4}$	$X(+)$	$X(-)$	Y	z_i
				I		I		I		I	z_1
					I		I		I	I	z_2
I		I						I		-I	z_3
	I		I						I	-I	z_4
	I			I				I		0	z_5
			I			I		I			
I					I				I	0	z_6
		I					I		I		

Функції переходу рівні:

$$\begin{aligned}
 W_{z_{5,1}} &= F_{A1}F_{A3}X_{(+)}; W_{z_{1,5}} = F_{T2}F_{A1}X_{(+)}; W_{z_{5,6}} = F_{T1}F_{A2}X_{(-)}; \\
 W_{z_{6,3}} &= F_{T1}F_{T3}X_{(+)}; W_{z_{3,6}} = F_{T1}F_{A2}X_{(-)}; W_{z_{6,6}} = F_{T3}F_{A4}X_{(-)}; \\
 W_{z_{6,2}} &= F_{A2}F_{A4}X_{(-)}; W_{z_{2,6}} = F_{T3}F_{A4}X_{(-)}; W_{z_{6,5}} = F_{T4}F_{A3}X_{(+)}; \\
 W_{z_{5,4}} &= F_{T2}F_{T4}X_{(-)}; W_{z_{4,5}} = F_{T4}F_{A3}X_{(-)}; W_{z_{5,5}} = F_{T2}F_{A1}X_{(+)} .
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

Таким чином, імпульсний чотириквдратний ВІП представлений в формі комбінаційної схеми.

2.4 Висновки до розділу

Застосування на електровозах плавного регулювання напруги (ВЛ65, ВЛ85, ЕП1) вимагає прийняття спеціальних заходів для поліпшення коефіцієнта потужності.

Тривалість процесу комутації і пов'язані з нею комутаційні втрати напруги в керованому випрямлячі визначаються індуктивністю розсіювання трансформатора випрямляча і електротягової мережі.

Мінімальний кут відкриття тиристорів α_0 і максимальне значення кута регулювання $\alpha_{p \max}$ визначаються мінімальною анодною напругою на тиристорах, необхідною для їх надійного відкриття.

Мінімальна фаза імпульсів керування $\alpha_{r \min}$ обмежена процесами мережевої комутації в випрямно-інверторному перетворювачі.

Величина і форма вихідної напруги автономного інвертора визначається величиною навантаження. Близька до синусоїдальної форма вихідної напруги інвертора зберігається в обмеженому діапазоні параметрів ланцюга навантаження.

4q-S перетворювач забезпечує нульовий зсув між споживаним струмом і напругою в режимі випрямлення і протифазний напрямок струму в режимі інвертування. Мережевий струм має практично синусоїдальну форму, що визначає високі енергетичні показники цього перетворювача.

Чотириквдратний перетворювач дозволяє істотно поліпшити коефіцієнт потужності мережі і забезпечити високу ступінь згладжування пульсацій струму навантаження. Однак, як і всі регулятори струму, він не дозволяє в широкому діапазоні регулювати вихідну напругу. Тому застосування такого перетворювача виправдано в поєднанні з АІН з внутрішнім регулюванням напруги.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ І ЕЛЕКТРОВОЗІВ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Вибір програмно-апаратної бази для моделювання

Дослідження електромагнітних процесів, що відбуваються в складній системі «електротягова мережа - ЕРС» є актуальним завданням. Адекватність обліку впливу зміни параметрів електротягової мережі при русі ЕРС по електрифікованій ділянці залежить від точності математичної моделі енергетичної взаємодії електровозів однофазного струму з електротяговою мережею. Це необхідно для вирішення поставлених в першому розділі задач. Однак варто зауважити, що модель згаданої системи описується нелінійними рівняннями, що сильно ускладнює розрахунок.

У проектних організаціях для розрахунку такого роду завдань використовуються спеціалізовані програмні пакети: RastrWin, MUSTANG, Дакар і інші. Ці пакети мають специфічний інтерфейс і досить складні в освоєнні. Зокрема схема мережі в цих програмах зазвичай задається шляхом заповнення таблиць вузлів, гілок і шунтів. Робота з таблицями вимагає певного досвіду і підвищеної уваги [12].

Для дослідження електромагнітних процесів, що виникають в системі «Електротягова мережа - електрорухомий склад», на кафедрі «Електропостачання залізниць» ДНУЗТ широко використовується пакет MATLAB-Simulink з бібліотекою SimPowerSystems, який дозволяє моделювати роботу силових електричних ланцюгів.

З огляду на досвід попередніх робіт [11,14], в якості бази для реалізації моделі був обраний програмно-апаратний комплекс імітаційного моделювання, що володіє такими перевагами, як простота складання силової схеми і налагодження пристроїв, висока швидкість проведених обчислень і можливість підключення реальних мікропроцесорних систем при необхідності [3].

Розробка імітаційної моделі електричної залізниці виконано в системі

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

комп'ютерної математики Matlab, що випускається фірмою The MathWorks, Inc [45,46,49]. Для розрахунку системи тягового електропостачання застосовані пакети MATLAB, Simulink і SimPowerSystems.

На даний момент Sim Power Systems вважається одним з кращих пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв. Саме його наявність визначає вибір системи MatLab - Simulink як інструмент для проведення даного дослідження. Він значно перевершує аналогічні продукти для моделювання електричних та електронних кіл, такі як Electronics Workbench, OrCAD і DesignLab, по частині функціональних можливостей [13].

Використання моделі енергосистеми паралельно з пакетом Кортес, або з моделлю розрахунку системи тягового електропостачання, дає можливість проектування комплексу тягового і зовнішнього електропостачання електрифікованих ділянок. Після тягового розрахунку, що виконується в пакеті Кортес, попередньо намічаються місця розміщення тягових підстанцій і їх еквівалентні значення таких параметрів як активний і реактивний опір. Для запропонованого розташування і характеристик тягових підстанцій в середовищі Simulink - SimPowerSystems створюється модель схеми зовнішнього і тягового електропостачання.

Програмний комплекс Кортес призначений для вирішення на персональних ЕОМ в середовищі Windows різних розрахункових завдань, пов'язаних з вибором параметрів, визначенням характеристик режимів і здатності навантаження систем тягового електропостачання і їх окремих елементів.

Серед основних можливостей, реалізованих в Кортес, можна відзначити наступні:

- визначення тягового навантаження з урахуванням рекуперації енергії, а також кратності тяги по окремим перегонам ділянки;
- виконання електричних розрахунків на основі моделювання графіка руху поїздів різних категорій - швидкісних, пасажирських, вантажних (в тому числі підвищеної маси), приміських та ін.;
- розрахунок схем зон живлення від декількох тягових підстанцій при

наявності прилеглих ділянок;

- облік реальної схеми підключення тягових підстанцій і постів секціонування до контактної мережі при заданому розташуванні повітряних проміжків.

Комплекс Кортес має гнучку структуру і включає в себе програмні модулі різного призначення, пов'язані між собою спільними базами даних і способами управління. Набір модулів може поповнюватися компонентами для вирішення специфічних завдань як в області проектування систем електропостачання, так і їх експлуатації.

Таким чином, пакет MATLAB з розширеннями Simulink і SymPowerSystems разом з пакетом Кортес дозволяє практично повністю задовольнити потреби для дослідження електромагнітних процесів, що виникають в складній системі «електротягова мережа - електрорухомий склад».

3.2 Імітаційна модель системи електропостачання змінного струму

Значний вплив на роботу електровоза при його експлуатації надає контактна мережа [14]. У зв'язку з цим, адекватність розробляємої математичної моделі безпосередньо залежить від точності врахованих параметрів контактної мережі.

Фундаментальні дослідження власних і взаємних опорів проводів, які лежать в основі використання електричних параметрів проводів контактної мережі, виконані Ф. Поллячеком і Дж. Карсоном. Отримане ними точне рішення задачі засноване на припущенні про те, що прямолінійний нескінченно довгий провідник прокладений паралельно горизонтальній поверхні однорідної землі. Відомо, що контактну мережу необхідно розглядати як ланцюг з розподіленими параметрами або довгу лінію, якщо її довжина більше довжини хвилі протікаємого в ній струму або поширюємії по ній напруги [6].

Довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda = v \cdot T, \quad (3.1)$$

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де T - період напруги;

v - фазова швидкість поширення хвилі.

Довжина хвилі випромінювання частотою 50 Гц в вакуумі становить $\lambda \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 0,02 = 6 \cdot 10^6 \text{ м} \approx 6000 \text{ км}$ [11]. Однак практика показує, що швидкість поширення електромагнітної хвилі в вакуумі не досягається фазовою швидкістю, за рахунок чого контактна мережа на промисловій частоті при досить малих довжинах не проявляє характер поведінки довгої хвилі. У свою чергу, частоти генеруються при постійних комутаціях силових напівпровідникових приладів (СПП) і випрямного-інверторного перетворювача (ВІП) при експлуатації ЕРС можуть досягати до $5 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, а відповідна довжина хвилі всього десятки кілометрів, що можна порівняти з відстанню між тяговими підстанціями [6]. Контактна мережа починає проявляти себе як довга лінія і відповідними електромагнітними процесами нехтувати вже не можна [15].

Аналіз виконаних досліджень дозволив виявити досить високу стабільність електричних параметрів проводів контактної мережі в широкому діапазоні зміни питомого опору землі ρ , висоти підвісу проводів і рельєфу місцевості. З огляду на цю обставину, можна зробити висновок, що формули Ф. Поллячека, Дж. Карсона можуть бути рекомендовані для розрахунку опору проводів тягової мережі в діапазоні до $5 \cdot 10^3 \text{ Гц}$. При цьому похибка розрахунку не перевищить 5%.

Для реальних значень перехідного опору «рейки - земля» при видаленні навантаження від підстанції на відстань більше 5 км опір тягової мережі одного шляху n -коліїної ділянки з похибкою, що не перевищує 5%, виражається формулою:

$$z = z_k + \sum_{i=1}^n \alpha_i z_{ai} - \left(1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i z_h \right) z^2, \quad (3.2)$$

де z_k – опір проводів контактної мережі;

z_{ai} – взаємний опір між проводами розглянутого та i -го шляхів;

z_h – взаємний опір між проводами і рейками;

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

z_{pn} –еквівалентний опір рейок n шляхів;

α_i – відношення значення струму контактної підвіски i -го шляху, рівне $\alpha_i = I_i/I$ (тут I_i - струм контактної підвіски i -го шляху; I - струм контактної підвіски розглянутого шляху).

З формули (3.2) випливає, що при відомому струмозподілу, яке характеризується сукупністю значень $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_{n-1}$, опір тягової мережі визначається тільки чотирма основними параметрами: z_k, z_{pn}, z_{ai}, z_h . У разі одиночного дроту або рейки опір $z_k = z_0$ та $z_{pn} = z_p$ розраховуються за відомими формулами Ф. Поллячека або Дж. Карсона.

Опір проводу:

$$z = r_a + j\omega \left(L + \frac{\mu}{2} 10^{-4} \right), \quad (3.3)$$

де r_a - активний опір проводу, Ом/км; в тих випадках, коли в якості струмопровідних елементів проводу використовується мідь або алюміній, активний опір приймається рівним опору проводу постійного струму;

ω – кругова частота;

μ - магнітна проникність проводу (для мідних і алюмінієвих проводів $\mu = 1$);

L - індуктивність проводу, Гн/км.

Індуктивність нескінченно довгого проводу, розташованого на висоті h над поверхнею однорідної землі, можна розрахувати за наближеною формулою Ф. Поллячека:

$$L \approx \left(2 \ln \frac{2}{\gamma k R} + 1 - \frac{j\pi}{2} + \frac{8jk h}{3} \right) 10^{-4}, \quad (3.4)$$

де γ - постійна Ейлера ($\gamma = 1,7811$);

R - розрахунковий радіус проводу, см;

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

h - висота проводу над поверхнею землі, см;

$3/k$ - визначає глибину зони розтікання зворотного струму в землі, см.

Фізичний параметр, що характеризує електромагнітні властивості системи:

$$k^2 = -4\pi j\omega\sigma, \quad (3.5)$$

де σ - питома провідність землі, од. СГС μ_0 ; (1 од. СГС $\mu_0 = 1011$ См/м).

Зауважимо, що у всьому подальшому викладі параметри тягової мережі будуть визначатися для частоти 50 Гц, використовуваної при електрифікації залізниць України. У цьому випадку при розрахунку опору проводів контактної мережі останнім членом виразу (3.4) з огляду на його малості можна знехтувати, і формула (3.3) записується в остаточному вигляді:

$$z_k = r_a + 0,05 - j0,144(1,42 + \lg(R\sqrt{\sigma})). \quad (3.6)$$

Значення власних опорів проводів наведені в табл. 3.1. Дані відносяться до опору землі $\rho = 100$ Ом·м. Вхідні в табл. 3.1 величини пов'язані співвідношенням:

$$z_0 = r_0 + jx_0 = |z_0|e^{j\varphi_0}. \quad (3.7)$$

Взаємний опір двох проводів:

$$z_M = j\omega M, \quad (3.8)$$

де M - взаємна індуктивність проводів, Гн/км.

Взаємна індуктивність між двома нескінченно довгими проводами, розташованими над поверхнею землі, також розраховується за аналогічною формулою Ф. Поллячека:

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M \approx \left(2 \ln \frac{2}{\gamma k R} + 1 - \frac{j\pi}{2} + \frac{4jkh}{3} (h_1 + h_2) \right) 10^{-4}, \quad (3.9)$$

де a - відстань між проводами, см;

h_1, h_2 - висоти розташування проводів над поверхнею землі, см;

k, γ мають таке ж значення, що і в формулі (3.4).

Таблиця 3.1 – Опір марок проводів

Марка проводу	$q, \text{мм}^2$	$2R, \text{см}$	$r_0, \text{Ом/км}$	$x_0, \text{Ом/км}$	$ z_0 , \text{Ом/км}$	$\varphi_0, \text{град}$
Контактний провід						
МФ-100	100	1,23	0,229	0,762	0,795	73°15'
МФ-85	85	1,13	0,260	0,767	0,810	71°15'
МФ-85	72	1,13	0,297	0,767	0,823	68°50'
Несучий трос						
М-120	113	1,40	0,208	0,753	0,782	74°35'
М-95	90	1,25	0,250	0,761	0,802	71°50'
АС-185	105	1,85	0,220	0,726	0,759	73°10'
АС-120	66	1,52	0,320	0,748	0,813	66°50'
АС-95	54	1,35	0,380	0,756	0,845	63°20'
АС-70	39	U4	0,510	0,767	0,920	56°25'
ПБСМ1-95	32	1,25	0,613	0,761	0,978	51°05'
ПБСМ2-95	25	1,25	0,754	0,761	1,070	45°15'
ПБСМ1-70	25	1,10	0,781	0,769	1,095	44°35'
Посилючий провід						
А-185	105	1,75	0,220	0,746	0,772	73°25'
А-150	85	1,58	0,260	0,753	0,790	70°45'
А-120	66	1,40	0,320	0,769	0,817	66°55'

При розрахунку взаємного опору між проводами контактної мережі останнім членом виразу (3.9) з огляду на його малості можна знехтувати. Тоді формула (3.8) набуде вигляду:

$$z_k = 0,05 - j0,144(1,53 + \lg a \sqrt{\sigma}) . \quad (3.10)$$

Взаємні опори, розраховані за формулою (3.10), представлені на рис. 3.1.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Детальний опис взаємних опорів ділянки лінії описані в [15], тут вони розглядатися не будуть.

Відомо, що ділянку лінії з деякою довжиною Δx можна представити у вигляді звичайно елементної моделі лінії Т - подібної форми, заснована на послідовному включенні всіх кінцевих елементів згідно зі схемою заміщення (рис. 3.1).

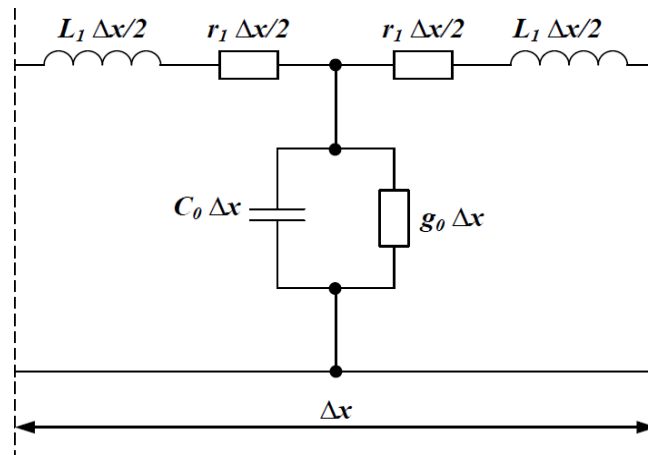


Рисунок 3.1 – Схема заміщення кінцевого елемента контактної мережі довжиною Δx

Представлена схема заміщення може бути описана системою звичайних диференціальних рівнянь, кількість яких залежить від кількості інтервалів розбивки ділянки довгої лінії (кінцевих елементів). Чим менше значення Δx , тим більше кількість кінцевих елементів, які складають ділянку контактної ланцюга, а отже більш точним буде опис електромагнітних процесів, що відбуваються на модельованій ділянці [10]. Коли $\Delta x \rightarrow 0$, число кінцевих елементів буде нескінченно, а система рівнянь буде еквівалентна системі двох рівнянь в приватних похідних:

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = ir_1 + L_1 \frac{di}{dt}; \\ -\frac{du}{dx} = ug_0 + C_0 \frac{du}{dt}. \end{cases} \quad (3.11)$$

Дослідження ділянки контактної мережі раніше виконані в роботах [2,

5,14]. За дослідженнями [4, 8] зроблено висновок, що наведена на рис. 3.1, схема заміщення кінцевого елемента ділянки контактної мережі адекватна реально модельованій ділянці контактної мережі, і саме така кінцева елементна модель використовується в даній дипломній роботі.

3.3 Імітаційна модель електротягової мережі і електровозів з перетворювачами однофазно-постійного струму

Пропонована імітаційна модель системи електротяги - ЕРС реалізована в пакеті MatLab - Simulink (рис. 3.2). Модель включає модулі джерела живлення системи зовнішнього електропостачання (1), силового трансформатора підстанції (2), еквівалентної електротягової мережі (3) і моделей тягових перетворювачів електровозів (4 і 5).

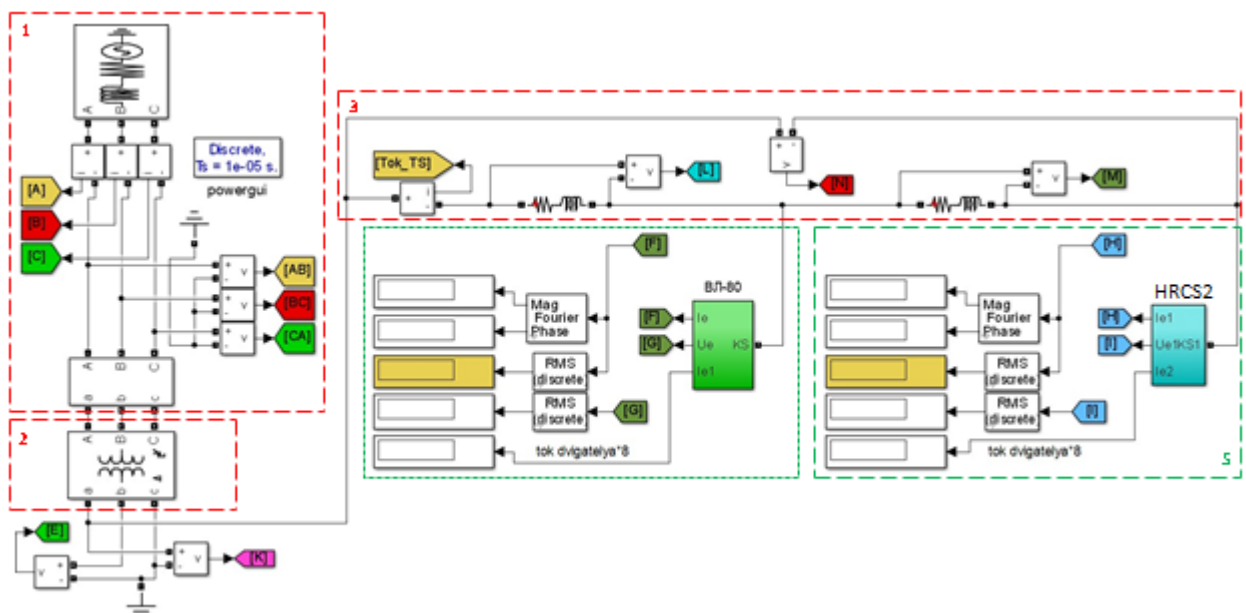


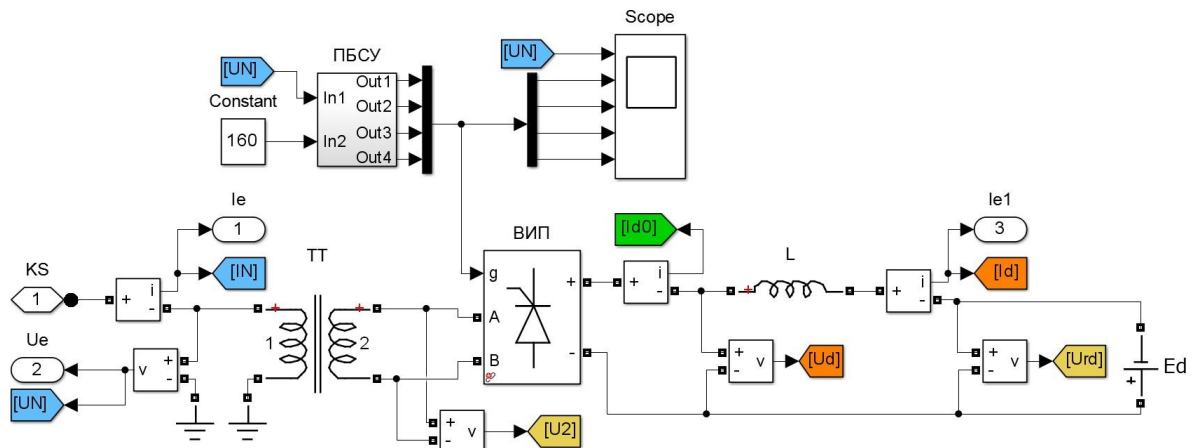
Рисунок 3.2 – Реалізація імітаційної моделі в пакеті Matlab_Simulink для миттєвої схеми електротягової мережі

Система зовнішнього електропостачання (1) в моделі задана джерелом еквівалентної електрорушійної сили (ЕРС), відповідними активним опором R і індуктивністю L . Модель силового трифазного трансформатора (2) тягової підстанції виконана з урахуванням особливостей її роботи на однофазне навантаження електротягової мережі. Електротягова мережа (3) прийнята

відповідно до [7] для одноколіїної ділянки з питомим активним опором $R = 0,194$ Ом і індуктивним опором $L = 1,477$ мГн на 1 км довжини контактної мережі [9].

У свою чергу, силові схеми електровозів (блоки (4) і (5) на рис. 3.2) в моделі представлені (див. на рис. 3.3) блоками тягових трансформаторів (ТТ), випрямно-інверторним, для ВЛ-80р, і чотириквдратним, для Hyundai, перетворювачами (ВІП і 4q-S) і блоками тягового навантаження (Ed).

а)



б)

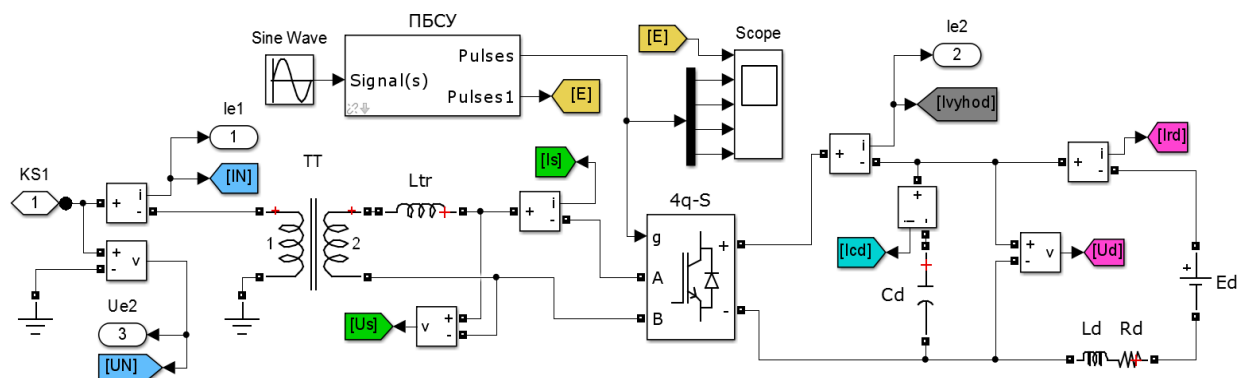


Рисунок 3.3 – Моделі електровозів ВЛ-80р (а) і HRCS2 (б) в пакеті Matlab_Simulink

Послідовно включені "Ld", "Rd" і "Ed" представляють еквівалентне навантаження або джерело електричної енергії, в залежності від співвідношення напруги джерела ЕРС "Ed" і напруги "Ud" на конденсаторі фільтра "Cd". Відсутність резонансного фільтра LC пояснюється тим, що він не є обов'язковим

елементом даної схеми і в деяких випадках може бути відсутнім [14].

У колі змінного струму індуктивність " L_{tr} " є необхідним елементом, а синусоїдальна напруга " U_s " на вторинній обмотці ТТ, в залежності від фазного зсуву між струмом " I_s " і напругою " U_s ", може споживати або генерувати електричну енергію. Нехтування опором " R_s " характеризує втрати потужності, яке послідовно повинно бути пов'язане з " L_{tr} " пояснюється умовою $\omega_s L_s \gg R_s$ (що, як правило, виконується для потужних перетворювачів).

При нормованій напрузі в контактній мережі $U_{max} = 29$ кВ, $U_{min} = 21$ кВ, а номінальна напруга буде $U_{nom} = 25$ кВ. Відносні значення граничних даних в такому випадку рівні:

$$U_{max}^* = \frac{29000}{25000} = 1,16;$$

$$U_{min}^* = \frac{21000}{25000} = 0,84.$$

Для нормованих U_{max}^* та U_{min}^* використовуючи вираз (2.52) отримаємо значення U_d^* :

$$U_d^* = \sqrt{2(1,16^2 + 0,84^2)} = 2,026.$$

Тобто для моделі ЕРС з 4q-S "HRCS2" напруга U_d рівна E_d , має становити:

$$U_d^* = U_d^* \cdot U_{(1)2} = 2,026 \cdot 1218 = 2467 \text{ В.}$$

При $\mu = 1$ згідно співвідношенню (2.45), вхідна напруга для моделі отримаємо:

$$U_{ex} = \mu \cdot \frac{U_d}{\sqrt{2}} = 1 \cdot \frac{2467}{\sqrt{2}} = 1749 \text{ В.}$$

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діюче значення першої гармоніки вхідної напруги перетворювача дорівнює:

$$U_{ex(1)}^* = \frac{U_d^*}{\sqrt{2}} = \frac{2,026}{\sqrt{2}} = 1,437.$$

З урахуванням виразу (2.51) знаходимо необхідне значення напруги КЗ трансформатора по виразу (2.53):

$$U_K(\%) = \frac{100 \cdot U_{\max}^* U_{\min}^*}{P_{\max}^*} = \frac{100 \cdot 1,16 \cdot 0,84}{2,5} = 39,5\%.$$

Маючи такі паспортні дані ЕРС «HRCS2»: $I_{ном} = 337$ А, $P_{\max}^* = 2,5$ $U_{2ном} = 1450$ В, Визначимо значення індуктивного опору обмоток трансформатора співвідношенням (2.54):

$$X = \frac{U_{ном} \cdot U_{\max}^* U_{\min}^*}{I_{ном} P_{\max}^*} = \frac{25000 \cdot 1,16 \cdot 0,84}{2,5 \cdot 337} = 28,91 \text{ Ом.}$$

Приведена до напруги первинної обмотки трансформатора індуктивність дорівнює:

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{28,91}{314} = 0,09 \text{ Гн.}$$

Коефіцієнт трансформації дорівнюватиме:

$$K_{тр} = \frac{U_{ном}}{U_{2ном}} = \frac{25000}{1450} = 17,2.$$

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Приведена до напруги вторинної обмотки трансформатора індуктивність дорівнює:

$$L_{2об} = \frac{L_{1об}}{K_{тр}^2} = \frac{0,09}{17,2^2} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Кожен з перетворювальних блоків, спеціально розроблений для виконання поставленого завдання, генерує відповідні сигнали [12] управління у вигляді імпульсів одноразового (при зонно-фазному управлінні) і багаторазового (при імпульсному регулюванні) пульсацій. На вхід перетворювального блоку сигналів управління (ПБСУ) подається напруга і відповідний кут регулювання α_p для зонно-фазного регулювання (рис. 3.4, а), а так само відповідний кут зсуву по фазі ψ і глибина модуляції μ для імпульсного управління 4q-S (рис. 3.4, б). На виході блоку ПБСУ утворюються імпульси управління fT і FM - частота тактового і модулюючого сигналу відповідно (рис. 3.4, б), які подаються в блоки ВП і 4q-S відповідно.

Датчики струму і напруги, розташовані по всій моделі фіксують і передають дані в блоки розрахунків і осцилограм. У блоках розрахунку виявляються діючі значення струмів і напруг, величини активної P , реактивної Q і повної S потужностей, а також потужності спотворення D у відповідних точках підключення датчиків. Блоки осцилограм дозволяють уявити фізичні форми кривих розрахованих значень.

Відомо, що робота силової електроніки на електровозах з колекторними тяговими двигунами і зонно-фазовим регулюванням напруги на них призводить до зниження його енергетичних показників якості, до яких відноситься:

- коефіцієнт потужності;
- коефіцієнт спотворення напруги на струмоприймачі ЕРС;
- коефіцієнт спотворення струму на струмоприймачі ЕРС, визначення яких описано в главі 2 даної роботи.

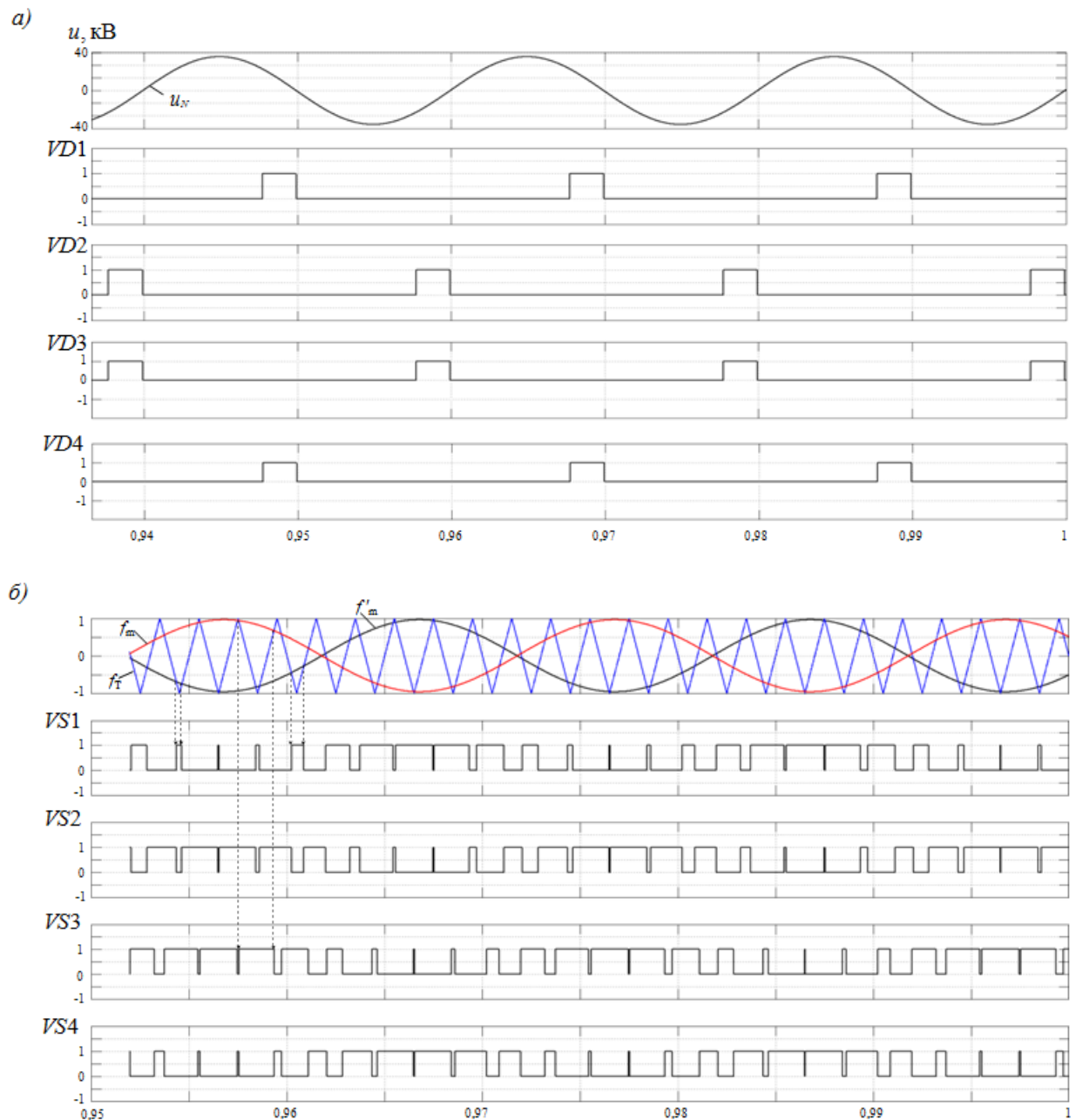


Рисунок 3.4 – Сигнали управління при зонно-фазному (а) і при імпульсному (б) регулюванні

Після цього, отримані значення параметрів схеми заміщення електровоза фіксуються в базі даних в табличній формі в програмі Microsoft Excel. У свою чергу, табличний файл програми Microsoft Excel налаштований на розрахунок всіх гармонійних складових напруги і струму до сорокового порядку, їх амплітудних значень, кута зсуву і складових потужності кожної гармоніки. Таблиця також дозволяє виконати розрахунок коефіцієнтів потужностей

електротягової мережі і досліджуваних електровозів, виконати гармонійних аналіз частин складної системи "електротягова мережа -ЕРС".

На електровозах змінного струму з зонно-фазним регулюванням, реалізується низький коефіцієнт потужності, який в залежності від навантаження і віддалення електровоза від тягової підстанції знаходиться в межах 0,65...0,85. Відповідно до результатів великих експериментів [8], електровози змінного струму типу ВЛ80Р з рекуперативним гальмуванням мають ще нижчий коефіцієнт потужності: в режимі тяги - 0,82; в режимі рекуперації - 0,5175.

Низькі значення коефіцієнта потужності свідчать про підвищене споживання реактивної потужності, а так само про появу спотворень напруги і струму на струмоприймачі електровоза. При цьому в тягової мережі протікають реактивні струми, що викликають додаткові втрати енергії, що передається, наслідком чого стане збільшення витрати енергії на тягу поїздів.

Таким чином, забезпечення високих енергетичних показників якості електроенергії, споживаної такими електровозами з зонно-фазним управлінням, є актуальним завданням розвитку залізничного транспорту України. Так само актуальною є задача розробки докладної моделі, що найбільш повно відтворює процеси які відбуваються в системі електропостачання і тягового електроприводу електровозів змінного струму в режимі реального часу при русі по ділянці залізниці. Така модель полегшує проектування і налагодження різних технічних пристроїв, якими пропонується доповнювати типові силові схеми електрорухомого складу для підвищення якості споживаної електричної енергії. Крім того, використання такої моделі дозволить найбільш повно і точно оцінити ступінь впливу пропонованих пристроїв на процеси, що протікають в системі тягового електропостачання (РТЕС) більш обґрунтовано вибирати їх параметри і створювати оптимальні алгоритми їх управління [7,11].

3.4 Висновки до розділу

Сучасні способи перетворення однофазного струму на електровозах змінного струму ґрунтується на використанні імпульсних способів формування

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

кривої струму і напруги. Найбільш ефективною схемою, що пройшла апробацію на високошвидкісних локомотивах Німеччини є, чотириквдратний перетворювач 4qS.

Електровоз HRCS2 обладнаний чотириквдратним перетворювачем забезпечує коефіцієнт потужності електровоза більш 0,95 у всьому діапазоні зміни навантаження і параметрів системи тягового електропостачання.

Математична модель тягової мережі, що містить однорідну рейкову мережу з постійними по всій довжині хвильовими параметрами (γ , Z_B), принципово правильно відображає основні електромагнітні процеси в тягових мережах. Ця обставина дозволяє успішно використовувати цю математичну модель для оцінки гранично можливого діапазону зміни опору тягової мережі.

Відомі методи розрахунку опору тягової мережі, засновані на використанні математичної моделі, що містить однорідну рейкову мережу з постійними по всій довжині хвильовими параметрами (γ , Z_B), не враховують характерної риси магістральних залізниць - безперервного чергування перегонів і станцій.

Адекватність використаної імітаційної моделі підтверджена верифікацією усіх використовуваних в моделі отриманих даних в комплексній програмі Кортес з експериментальними даними.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕРС

4.1 Параметри і характеристики модельованої ділянки ТП1 – ТП3

Для виконання електричних розрахунків використані наступні параметри ділянки: кількість головних шляхів, типи профілів шляху і довжин перегонів, а також дані по роздільним пунктам і категоріям і типам поїздів. Основними таблицями, заповненими для розрахунку в даній ділянці, служили: випрямлення профіль колії і типи ЕРС. На рис. 4.1 представлений поздовжній профіль ділянки ТП1 – ТП3.

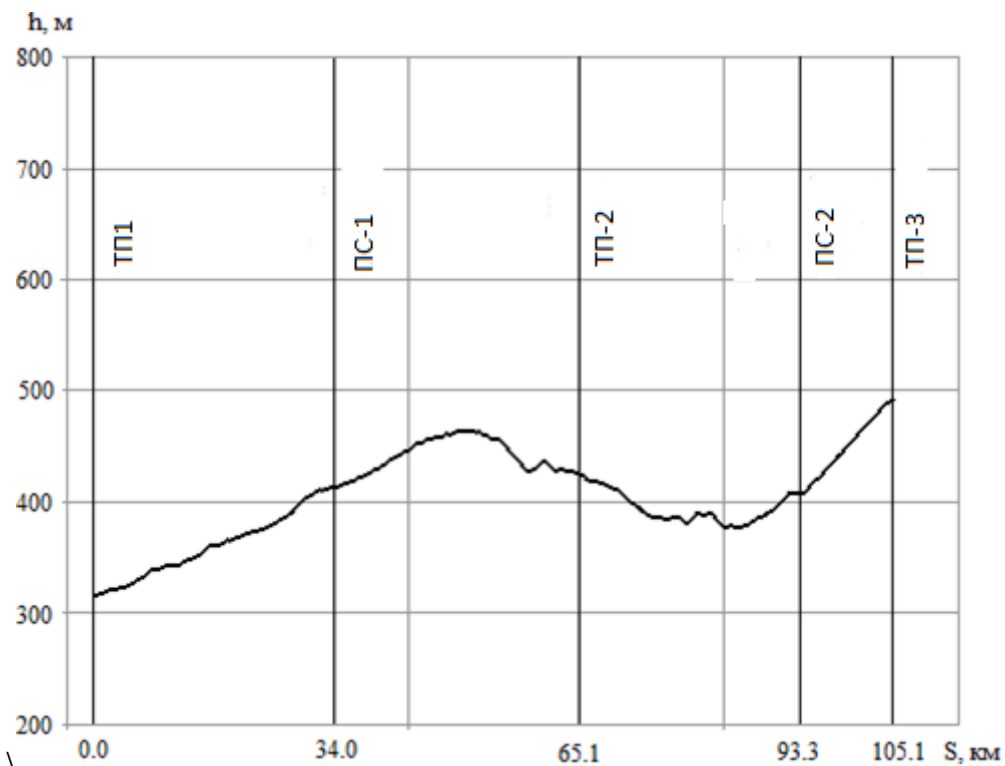


Рисунок 4.1 – Спрямлений профіль ділянки ТП1 – ТП3

Обрис поздовжнього профілю колії впливає на безпеку і плавність руху поїздів. Чим більше довжина елементів профілю і менше різниця ухилів суміжних елементів, тим менше поздовжні зусилля і прискорення, що виникають під час руху поїзда. На ділянці ТП1 – ТП3, де поїзди рухаються в стаціонарному режимі, наприклад на підвищеннях профілю, таких як ПС1, ТП2, обмежених затяжними

ухилами, допускається велика різниця ухилів суміжних елементів і менша їх довжина (так звані допустимі норми).

Швидкісна ділянка, протяжністю 105,1 км, включає 3 тягові підстанції та 2 пости секціонування (рис. 4.2).

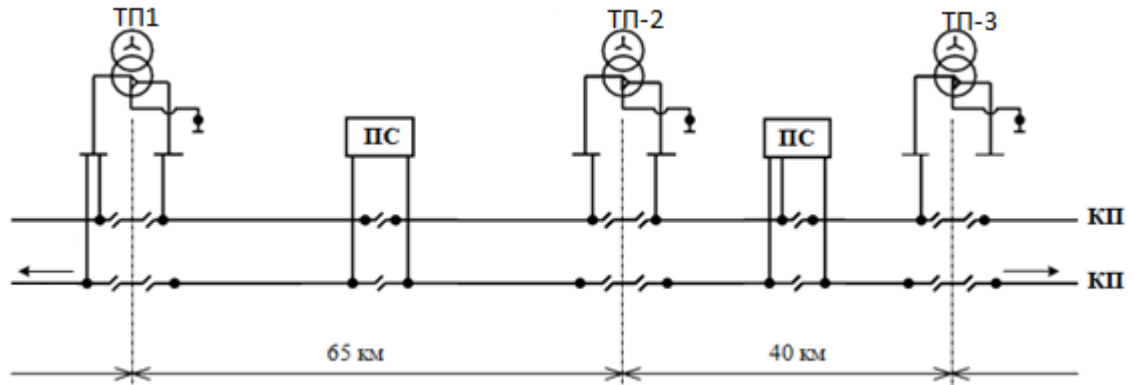


Рисунок 4.2 – Схема живлення швидкісної ділянки «ТП1 – ТП3»

Основне обладнання та параметри тягових підстанцій [6,13] наведені в табл. 4.1, 4.2.

Таблиця 4.1 – Основне обладнання тягових підстанцій

Найменування	Тип трансформатору	Номінальна потужність, кВА	Номінальна напруга, кВ	Струм холостого ходу, %	Напруга короткого замикання, %
ТП1	ТДТНЖ-25000/110-69У1	25000	110/27,5	0,9	10,5
ТП2	ТДТНЖ-40000/220-76У1	40000	220/27,5	1,1	12,5
ТП3	ТДТНЖ-25000/110-69У1	25000	110/27,5	0,9	10,5

Таблиця 4.2 – Струми трифазного короткого замикання на вводах підстанцій

Найменування	U _{ср} , кВ	I _{кз max} , кА	I _{кз min} , кА
ТП1	115	3,2	2,8
ТП2	230	3,22	1,288
ТП3	115	2,965	1,186

Потужність трифазного КЗ на вводах підстанцій, МВА:

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot I_{K3 \min} \cdot U_n.$$

Потужність трифазного КЗ на вводах тягової підстанції ТП1:

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot 2800 \cdot 115 \cdot 10^{-3} = 558 \text{ МВА.}$$

Потужність трифазного КЗ на вводах тягової підстанції ТП2:

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot 1288 \cdot 230 \cdot 10^{-3} = 513 \text{ МВА.}$$

Потужність трифазного КЗ на вводах тягової підстанції ТП3:

$$S_{K3} = \sqrt{3} \cdot 1186 \cdot 115 \cdot 10^{-3} = 236 \text{ МВА.}$$

При складанні миттєвих схем тягова підстанція представляється у вигляді джерела ЕРС з послідовно включеним опором, так званим внутрішнім опором підстанції. Це опір враховує падіння напруги в обладнанні підстанції та в системі зовнішнього електропостачання.

У нормальному режимі на тяговій підстанції один понижуючий трансформатор знаходиться в резерві.

Основні технічні дані електровозів наведені в табл. 4.3.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Основні технічні дані електровозів ВЛ-80р і HRCS2

Параметри і характеристики	Тип електровоза	
	ВЛ-80Р	HRCS2
Рід струму	змінний	
Номінальна напруга живлення, кВ	25	
Частота, Гц	50	
Формула ходової частини	2 ₀ -2 ₀ -2 ₀ -2 ₀	Во- Во- Во
Колія, мм	1520	
Конструкційна швидкість, км / год	110	120
Маса електровоза з 2/3 запасу піску, т	192 ± 4	138 ± 1
Маса, яка припадає на вісь, т	24 ± 0,7	23
Коефіцієнт потужності в тривалому режимі тяги	0,84	0,95
Працездатність при напрузі живлення, кВ	19-29	
Тяговий двигун	НБ-418К6	1ТВ-2624
Потужність двигуна, кВт	790	1020
Номінальна напруга ланки постійного струму, В	950	2063
Система управління електровозом	непряма, дистанційна	

Розрахункова схема системи тягового електропостачання з електровозами ВЛ- 80р і HRCS2 приведена на рис. 4.3.

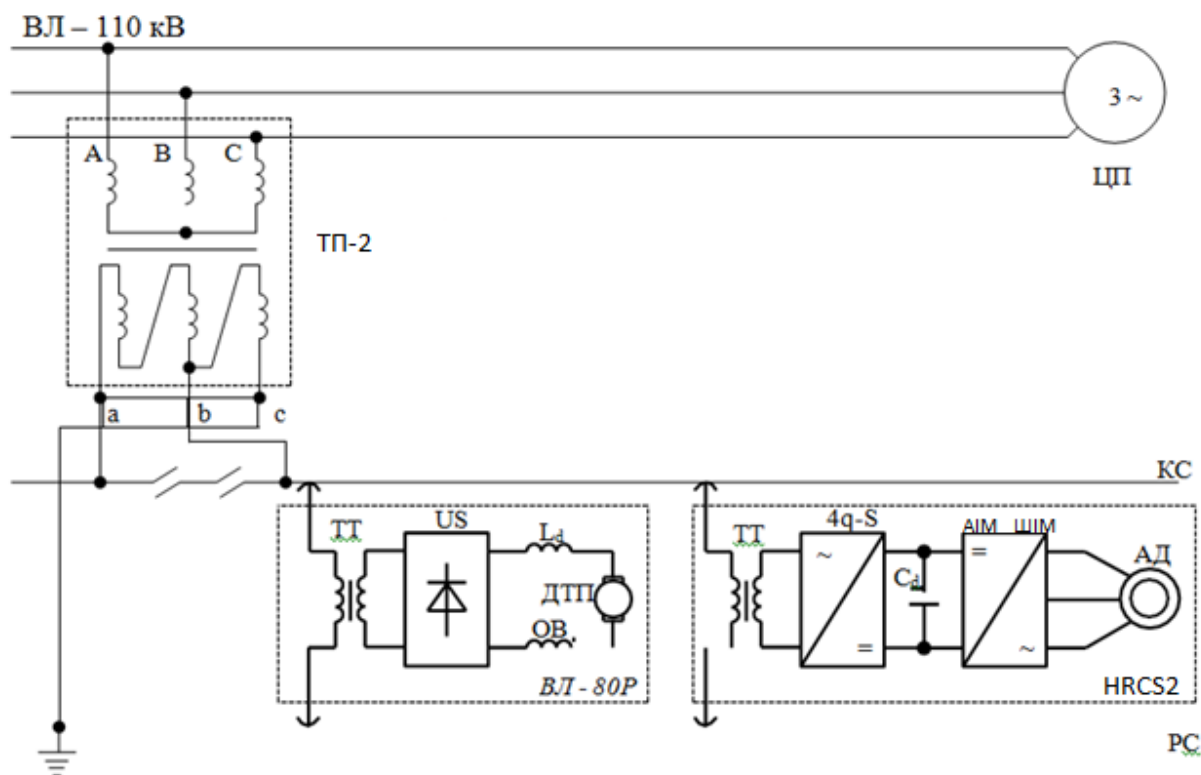


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема системи зовнішнього і тягового

електропостачання з електровозами ВЛ-80р і HRCS2

Тягова підстанція (ТП) з трифазним трансформатором забезпечує електроенергією однофазне навантаження електротягової мережі. ТП живиться від високовольтної лінії центрального живлення (ЦЖ) 110 кВ, 50 Гц. Від контактної мережі (КМ) електроенергія, напругою 25 кВ, подається до електровозів. Ланцюг тягового струму замикається по зворотній рейковій тяговій мережі (РС). Схема електровоза ВЛ-80р включає блок тягового трансформатора (ТТ), блок управління випрямно-інверторної установки однофазного струму (US) [3]; згладжуючий реактор (L_d), колекторний двигун постійного струму (ДПС) з обмоткою збудження (ОЗ) [44]. На електровозі HRCS2 застосовується сучасний безколекторний тяговий електропривод, схема якого містить тяговий трансформатор (ТТ), чотирикватратний перетворювач ($4q-S$) [14], конденсаторний фільтр (C_d), автономний інвертор напруги з широтно імпульсною модуляцією (АІН ШІМ) і асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД).

4.2 Режими електротягової мережі при експлуатації електровозів ВЛ-80р і HRCS2

Електричний рухомий склад (ЕРС) з зонно-фазовим регулюванням впливає на якість електроспоживання за рахунок підвищеного рівня обміну з мережею живлення реактивною потужністю, спотворення синусоїдальності споживаного струму і завантаження електротягової мережі непарними вищими гармонійними складовими. Це викликає нестабільність рівня напруги в контактній мережі і підвищення втрати потужності в електротягової мережі, а також робить негативний вплив на електроенергетичні показники тягових підстанцій і системи зовнішнього електропостачання.

Електровози нового покоління, обладнані однофазними перетворювачами з імпульсним принципом управління, що дозволяють формувати синусоїдальну криву струму в мережі живлення при взаємодії з електротяговою мережею, створюють сприятливі умови щодо зниження завантаження мереж реактивною енергією і зменшення вмісту вищих гармонійних складових. Ці умови сприяють

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищенню енергетичної ефективності роботи електротягової мережі.

При спільній роботі ЕРС з зонно-фазовим регулюванням і імпульсними чотириквadratними перетворювачами можуть бути реалізовані режими роботи, в яких електровоз з імпульсним регулюванням може виступати як компенсатор відстаючої реактивної потужності і як регулятор гармонійного складу струму тягової мережі.

На рис. 4.4 представлені моделі випрямляча з зонно-фазовим регулюванням (ВЛ-80р), (а) і чотириквadratним перетворювачем з імпульсним керуванням (HRCS2), (б).

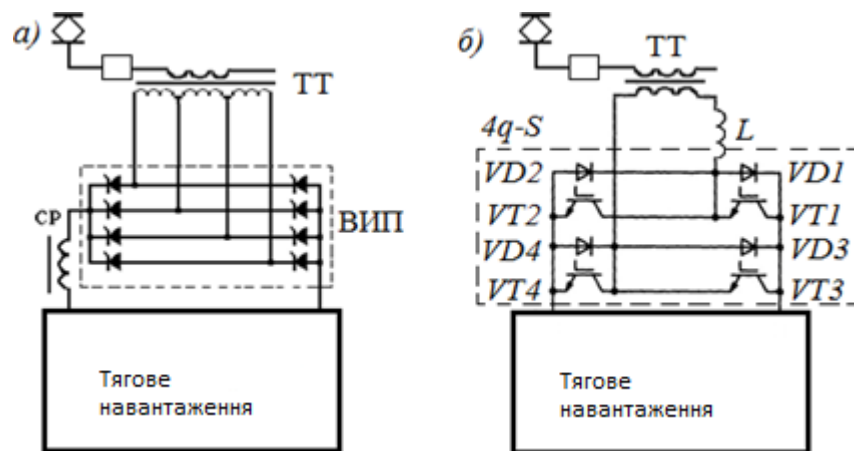


Рисунок 4.4 – Моделі тягових перетворювачів для електровозів ВЛ-80 (а) і HRCS2 (б)

На рис. 4.5 наведені діаграми напруг, струмів та потужності для розглянутих електровозів в режимі, зазначеним у вихідних даних.

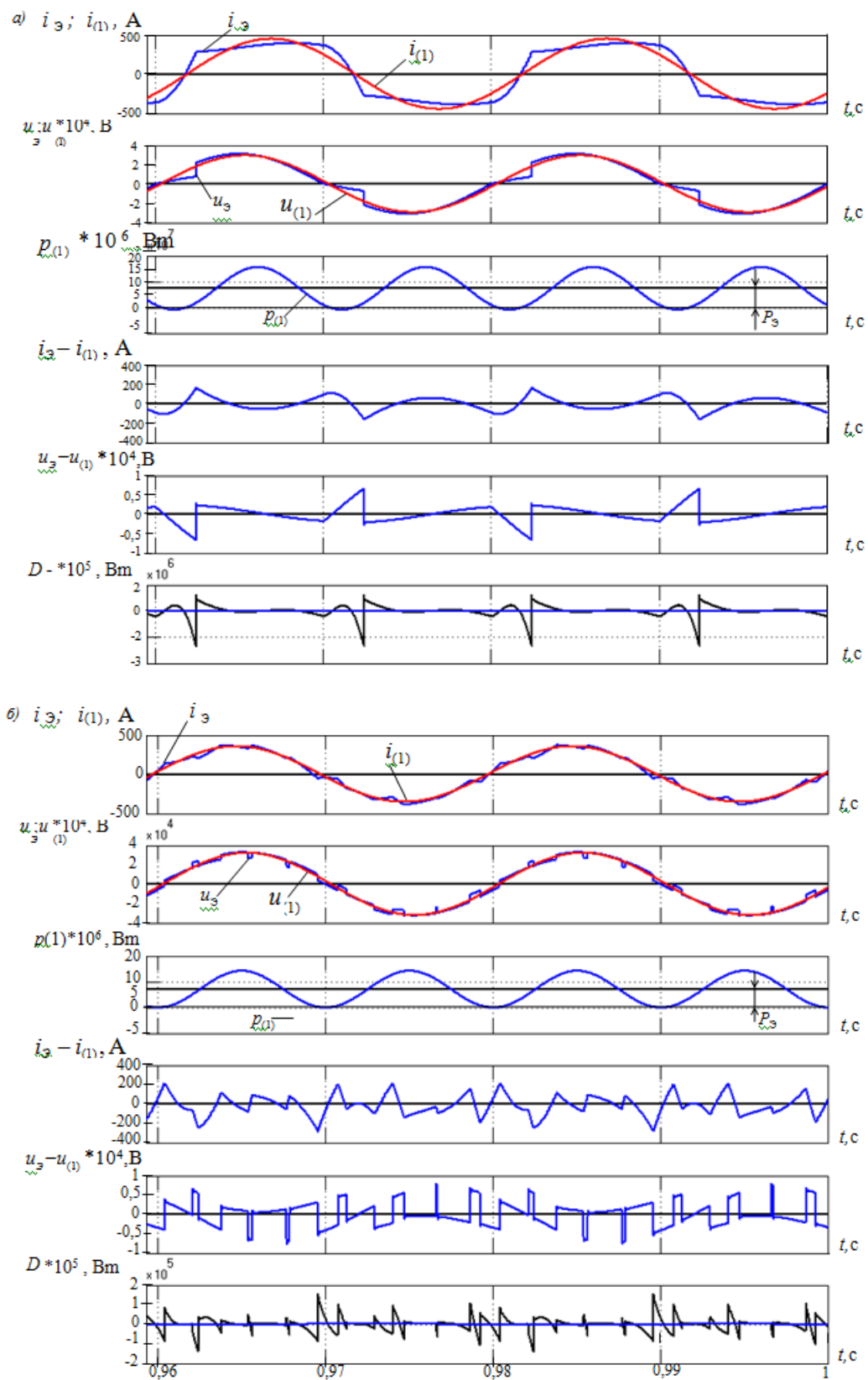


Рисунок 4.5 – Діаграма струмів, напруг і потужностей електровозів ВЛ-80 (а) і HRCS2 (б) для режиму роботи на 55 км лінії з поїздами масою 2200 т

Оцінка якості електроспоживання тягової навантаження на лінії ТП1-ТП-3 виконана за результатами аналізу процесів в електротяговій мережі за допомогою розробленої імітаційної моделі. За показники якості прийняті коефіцієнт потужності, значення гармонійних складових напруги і струму до 20-го порядку, повний (сумарний) коефіцієнт гармонік напруги з урахуванням впливу всіх гармонік напруги до 20-го порядку $k_{U(n)}$ в точці передачі електроенергії, потоки активної, реактивної потужності і потужності спотворення, а так само потужність втрат електроенергії в електротяговій мережі.

З аналізу діаграм (рис. 4.5) випливає, що активна потужність передається до ЕРС основної гармонійної складової $P_{(1)}$, а потужність спотворення D не бере участі в передачі енергії від ТП до ЕРС, а носить характер обміну енергією так само, як і реактивна складова потужності основної гармонійної складової $Q_{(1)}$. Спотворення по струму при експлуатації електровоза HRCS2 значно менше в порівнянні з електровозом ВЛ-80р.

Аналіз результатів моделювання режимів роботи електротягової мережі.

Миттєва потужність (див. рис. 4.5) пульсує з подвійною частотою мережі щодо середнього значення $P = UI \cos \varphi$.

В реальній схемі струми і напруги електротягової мережі несинусоїдальні і містять, крім основної гармонійної, спектр вищих гармонійних складових. При несинусоїдальності струму і напруги повна потужність визначається виразом (2.25). Коефіцієнт потужності визначається за виразом (2.31).

Досліджуємо вміст складових повної потужності шляхом аналізу виразу (2.25). Розкриємо вираження (2.25) у формі суми квадратів складових потужності, що визначаються множенням квадратів гармонійних складових напруги і струму, що чергуються по сполученням номерів гармонійних складових до дев'ятого порядку. Результати виділення квадратів складових потужності систематизовані в табл. 4.4.

Зі складу повної потужності S виділені квадрати повної потужності $S_{(1)}^2$ та вищих $D_{(3)}^2$, $D_{(5)}^2$, $D_{(7)}^2$, $D_{(9)}^2$ гармонійних складових, а також складових повної

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності з різними поєднаннями номерів вищих гармонійних складових напруги і струму. Наприклад, $D_{(1,3)}^2$ відповідає множенню квадрата напруги першої і квадрата третьої гармонійних складових.

Таблиця 4.4 – Компоненти квадрата повної потужності електричної мережі з несинусоїдальними струмом і напругою

$S_{(1)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(1,5)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(1,7)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(1,9)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(3,1)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(3,5)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(3,7)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(3,9)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(5,1)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(5,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(5)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(5,7)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(5,9)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(7,1)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(7,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(7,5)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(7)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(7,9)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(9,1)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(9,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(9,5)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(9,7)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(9)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(9)}^2$

З аналізу компонентів потужності, наведених у табл. 4.4, прийнято припущення, що складові потужності поділяються на 3 групи: гармонійні складові потужності вищих порядків (діагональ таблиці), що становляться від основних гармонійних напруги або струму і гармонійних складових вищого порядку струму і напруги (вертикаль і горизонталь таблиці) і всі інші поєднання номерів гармонік вищого порядку (клітини таблиці, що залишилися).

За виразами (2.28 - 2.30) наведені в розділі 2, виконані розрахунки потужностей основних і вищих гармонійних складових струму і напруги тягової мережі у розглянутих електровозів при знаходженні їх на відстані 10 км від тягової підстанції. Результати розрахунків наведені в правій частині табл. 4.5 - 4.8.

Результати гармонійного аналізу струмів і напруг ліній живлення тягової підстанції і електровозів з різними типами управління наведені в лівій частині табл. 4.5 - 4.8. Виділено основні і непарні вищі гармонійні складові до 20-го порядку.

Таблиця 4.5 – Значення гармонійних складових напруги, струму і потужності живильної лінії тягової підстанції при експлуатації ВЛ-80р

Гармоніки	U_m , В	I_m , А	$\varphi(n)$	$P(n)$, кВт	$Q1(1)$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	k_{IU} k_{II}
1-я	38600	447,8	-30,17	7472	4343	8642,5	8970,5	2403,3	0,83	0,996 0,966
3-я	2303	105,1	92,11	4,457	120,94	121,02				
5-я	1762	48,33	268,5	1,1146	42,56	42,58				
7-я	1167	22,92	91,54	0,359	13,37	13,34				
9-я	715,1	10,92	91,88	0,128	3,9	3,90				
еф. знач.	27388	328								

Таблиця 4.6 – Значення гармонійних складових напруги, струму і потужності електровоза ВЛ- 80р

Гармоніки	U_m , В	I_m , А	$\varphi(n)$	$P(n)$, кВт	$Q1(1)$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	k_{IU} k_{II}
1-я	36810	447,8	-28,015	7276	3871	8241,7	8612,5	2499,74	0,84	0,987 0,966
3-я	3798	105,1	94,51	15,7	199	199,59				
5-я	2901	48,33	267	3,669	70	70,1				
7-я	1921	22,92	92,59	0,995	22	22				
9-я	1177	10,92	92,71	-0,3	6,42	6,43				
еф. знач.	26295	328								

Таблиця 4.7 – Значення гармонійних складових напруги, струму і потужності живильної лінії тягової підстанції при експлуатації HRCS2

Гармоніки	U_m , В	I_m , А	$\varphi(n)$	$P(n)$, кВт	$Q1(1)$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	k_{IU} k_{II}
1-я	40640	354,6	8,56	7125,2	1072,5	7205,5	7213	328,8	0,988	0,999 0,999
3-я	366,7	15,85	91,57	0,08	2,905	2,906				
5-я	27,58	0,3	-163,1	0,004	0,0012	0,004				
7-я	19,19	0,1	-119,3	0,0005	0,0009	0,001				
9-я	17,34	0,37	70	0,001	0,003	0,003				
еф. знач.	28738	251								

Таблиця 4.8 – Значення гармонійних складових напруги, струму і потужності електровоза HRCS2

Гармоніки	U_m , В	I_m , А	$\varphi(n)$	$P(n)$, кВт	$Q1(1)$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	k_{IU} k_{II}
1-я	40230	354,6	11	7001,7	1361	7132,8	7140,7	336,56	0,981	0,999
3-я	601,9	15,85	93,88	0,322	4,76	4,77				
5-я	44,66	0,3	-162,5	0,006	0,002	0,006				
7-я	30,55	0,1	-123,1	0,0009	0,001	0,0017				
9-я	29,66	0,37	71	0,0018	0,005	0,005				
еф. знач.	28450	251								

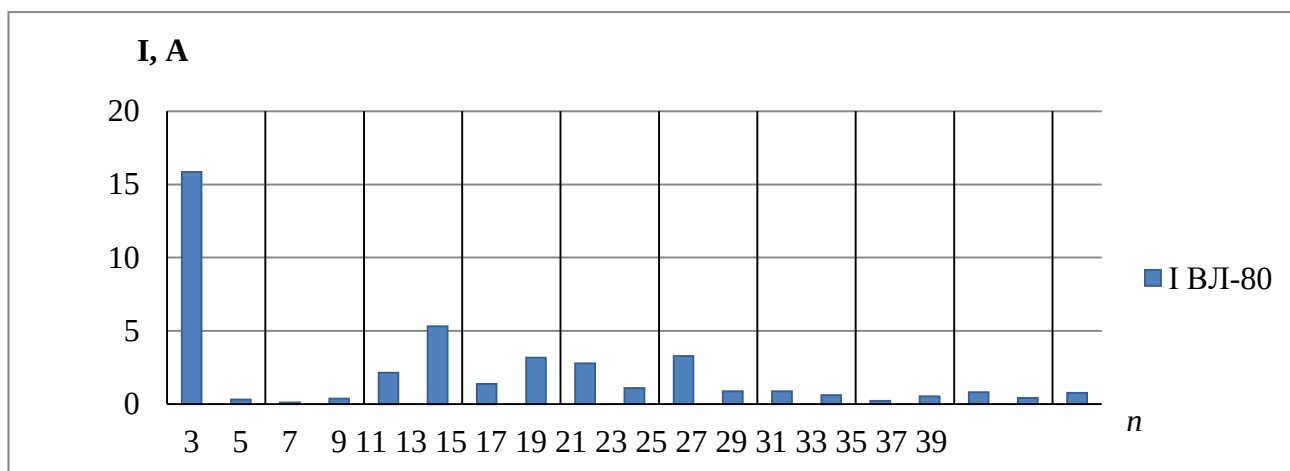
Результати розрахунків, наведені в табл. 4.5 - 4.8, При застосуванні електровозів з чотириквдратним перетворювачем з імпульсним регулюванням і електровозів з зонно-фазовим керуванням істотно відрізняються за значеннями потужності спотворення, які визначаються регулюванням кута зсуву основної гармоніки щодо напруги і формуванням кривої споживаного струму близької до синусоїдальної кривої. Значення $\varphi(n)$, наведені в табл. 4.7, 4.8, показують, що електровоз HRCS2 є генератором синусоїдального струму і випереджаючої реактивної потужності.

Порівняння режимів роботи мережі при живленні розглянутих електровозів з однаковою масою поїзда показують, що при застосуванні ЕРС з 4q-S з імпульсним регулюванням втрати потужності в електротяговій мережі знижуються на 1,5...2% від потужності електроспоживання, так як ефективне значення струму при тій же потужності електроспоживання знижується приблизно на 30% за рахунок істотного зниження реактивної потужності. Завдяки значному зниженню реактивної енергії і, як наслідок, повної енергії, - коефіцієнт потужності на тяговій підстанції $k_m = 0,99$, а на електровозі $k_m = 0,98$, тоді як при роботі електровоза ВЛ-80р k_m на тяговій підстанції і на самому електровозі склав 0,83 і 0,84 відповідно. Застосування електровоза з підвищеним коефіцієнтом потужності істотно знижує споживання реактивної потужності, а також сприяє зниженню втрат в електротяговій мережі. Порівняння показує, що збільшення спотворень струму і напруги призводить до збільшення неактивної потужності,

що залежить від реактивної потужності основної гармоніки і потужності спотворення.

На рис. 4.6 наведені результати спектрального аналізу вищих гармонійних струму електровоза з однофазним випрямлячем і напруг електровоза з чотирикватратним перетворювачем і тягової підстанції при його роботі, що підтверджують загальні закономірності формування спектрів несинусоїдального струму і напруги з комутаційними спотвореннями при роботі вхідних перетворювачів однофазного постійного струму.

а)



б)

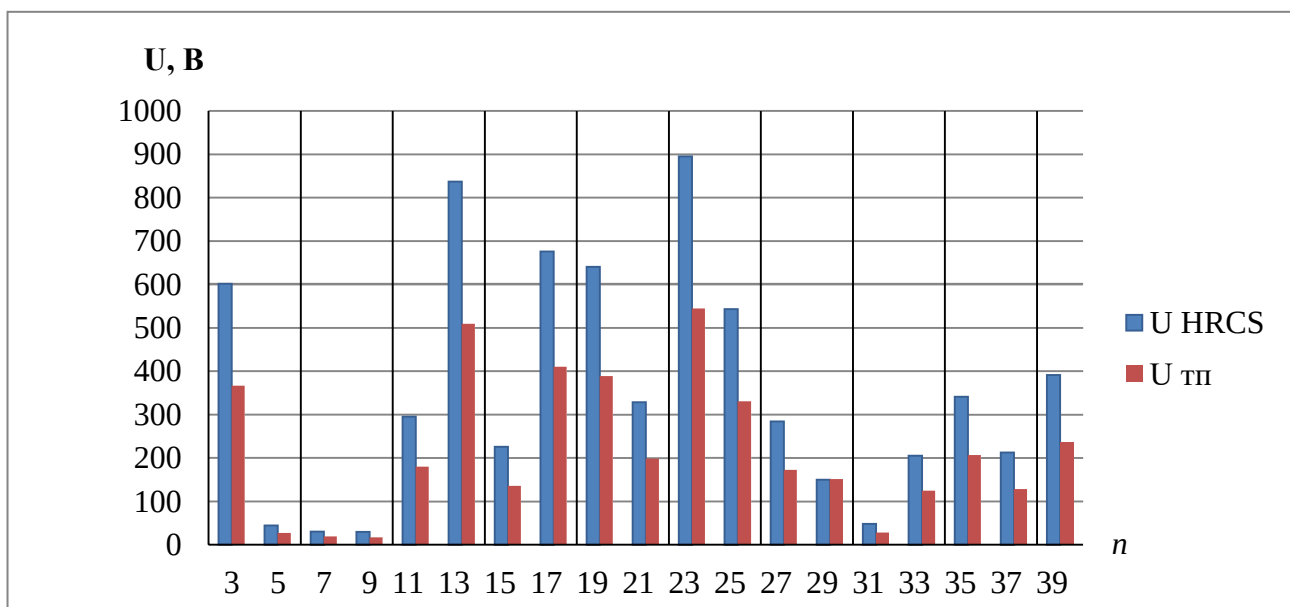


Рисунок 4.6 – Діаграми вищих гармонійних струму ВЛ-80 (а) і напруг HRCS2 і тягової підстанції при роботі HRCS2 (б)

Збільшення числа врахованих вищих гармонійних складових відбивається на характері зміни значень гармонійних напруги, струму і потужності вищого порядку. Характерним для ВЛ-80р є суттєва зміна в спектрі вищих гармонійних струму. Значення гармонійних з підвищенням порядку монотонно зменшуються (рис 4.6, а). Для HRCS2 характерним є зміна в спектрі напруги по певній закономірності - зі збільшенням порядку вищих гармонійних напруги в зоні частот близьких до частоти модуляції відзначаються підвищені значення амплітуд відповідних гармонійних напруги (рис 4.6, б).

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ НОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОДНОФАЗНО-ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МОБІЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

5.1 Дослідження енергетичних показників і розробка заходів щодо зниження питомої витрати електроенергії

Витрату енергії, що витрачається на переміщення поїзда, зручно визначати з використанням показника питомого електроспоживання. Питоме електроспоживання - це споживання енергії в ват·годину на тонну маси поїзда і кілометр пройденого шляху.

Енергоємність, що витрачається рушійними колісними парами електрорухомого складу, визначається витратами енергії на прискорення поїзда, подолання ухилу шляху і опору руху поїзда.

На величину струму, споживаного електрорухомим складом, значний вплив мають маса складу, середнє навантаження на вісь електровоза, профіль колії, наявність постійних і тимчасових обмежень швидкості, а також режим ведення поїзда машиністом. Від того, наскільки точно ці фактори будуть враховані при тяговому розрахунку, залежить точність і адекватність електричних розрахунків.

Факторами, що впливають на питоме електроспоживання є:

1. Типи електровоза. Під типами електровоза мається на увазі технічні дані і схеми силових ланцюгів розглянутих ЕРС. У дипломній роботі порівнюються такі електровози як ВЛ-80р і НRCS2, що знаходяться, на сьогоднішній день, в експлуатації залізниць України.

2. Способи гальмування (з рекуперацією і без неї).

3. Маса вантажного поїзда. При визначенні економічного ефекту від підвищення маси вантажного поїзда слід враховувати шляхи досягнення результату. Якщо підвищення маси поїзда відбувається за рахунок використання

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш потужних локомотивів або посилення верхньої будови колії, то при визначенні узагальненого економічного результату слід враховувати витрати на придбання нового рухомого складу або посилення матеріалів верхньої будови колії.

Якщо маса поїзда збільшується за рахунок кращого використання вантажопідйомності вагонів, то економічний ефект формується за рахунок економії експлуатаційних витрат.

Підвищення маси поїзда є однією з найбільш ефективних заходів скорочення перевізних ресурсів транспорту. Це забезпечує зниження експлуатаційних витрат, пов'язаних з пробігом рухомого складу:

$$\Delta C_Q = \sum Pl_{\bar{p}} (1/Q'_{\bar{p}} - 1/Q_{\bar{p}}) c_{пкм}, \quad (5.1)$$

де $\sum Pl_{\bar{p}}$ - тонно-кілометри брутто;

$c_{пкм}$ - укрупнена видаткова ставка.

Збільшення маси вантажного поїзда забезпечує економію витрат на паливо або електроенергію для тяги поїздів:

$$\Delta C_{\mathcal{E}} = \sum NS (1/Q'_{\bar{p}} - 1/Q_{\bar{p}}) [b'_{T(\mathcal{E})} - b_{T(\mathcal{E})} / 10000] \mathcal{U}_{T(\mathcal{E})}, \quad (5.2)$$

де $b'_{T(\mathcal{E})}$ - норма витрати електроенергії, кВт·год на 10000 т·км брутто;

$\mathcal{U}_{T(\mathcal{E})}$ - ціна електроенергії, грн.

Для аналізу електроспоживання електрифікованої ділянки ТП-1- ТПЗ нижче проведені розрахунки питомої витрати електроенергії.

Питомою витратою електроенергії на залізничному транспорті називається витрата електроенергії на виконання одиниці перевізного процесу. У вантажному русі розмірність питомої витрати електроенергії Вт·год/(т·км):

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$a_T = \frac{1000 \cdot A_T}{m_c \cdot L}, \quad (5.3)$$

де A_T - витрата електроенергії на тягу поїзда, кВт·год;

m_c - маса складу, т;

L - довжина ділянки, км.

З урахуванням власних потреб питома витрата електричної енергії, Вт·год/(т·км):

$$a'_T = \frac{1000 \cdot A_T}{m_c \cdot L} + \frac{1000 \cdot A_{CH}}{m_c \cdot L} = \frac{1000}{m_c \cdot L} (A_T + A_{CH}). \quad (5.4)$$

Питому витрату енергії прийнято також вимірювати в кВт·год на вимірювач 10^4 т · км. При цьому використовують перекладний коефіцієнт:

$$1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} = \frac{10000}{1000} \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}.$$

Залежно від умов руху питома витрата електричної енергії коливається в широких межах. Зазвичай у вантажному русі вона становить 10...20 Вт·год/(т·км), в пасажирському русі за рахунок більш високих швидкостей питома витрата енергії більше, ніж у вантажному - 20...30 Вт·год/(т·км). У приміському русі внаслідок втрат при частих пусках і гальмуванні питома витрата енергії електропоїздами має ще більші значення - 30...40 Вт·год/(т·км). При роботі надшвидкісних поїздів (зі швидкостями до 200 км/год) питома витрата енергії найбільша - до 60...80 Вт·год/(т·км).

Нижче наведені дані розрахунку витрати електроенергії розглянутих електровозів з масами в 5192 тонни для електровоза ВЛ-80р і 5138 тонн для електровоза НРС2 в непарному напрямку, а в парному 7192 тонни для електровоза ВЛ-80р і 7138 тонн для електровоза НРС2 відповідно. Кількість

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складів за напрямками становить 3 пари.

Тяговий розрахунок виконаний при номінальній напрузі на струмоприймачі, що дорівнює 25 кВ, 50 Гц.

У свою чергу енергія рекуперації по кожному перегону для ЕРС постійного струму розраховується згідно з правилами тягових розрахунків за виразом, кВт·год:

$$W_P^{\text{ЭПС}} = \frac{\sum U_{\text{Э}} I_{\text{Эср}} \Delta t}{1000}. \quad (5.5)$$

де Δt - час в рекуперації, год;

$I_{\text{Эср}}$ - середній струм електровоза в рекуперації, А;

$U_{\text{Э}}$ - фактична напруга на струмоприймачі ЕРС, В.

Для ЕРС змінного струму, кВт · г,

$$W_P^{\text{ЭПС}} = \frac{\sum U_{\text{Э}} k_v I_{\text{даса}} \Delta t}{1000}. \quad (5.6)$$

де $I_{\text{даса}}$ - діюче значення активного струму, середнє за час рекуперації Δt , А;

k_v - коефіцієнт форми кривої напруги на даному $U_{\text{Э}}$, який визначається в залежності від напруги на струмоприймачі електровоза (рис. 5.1)

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

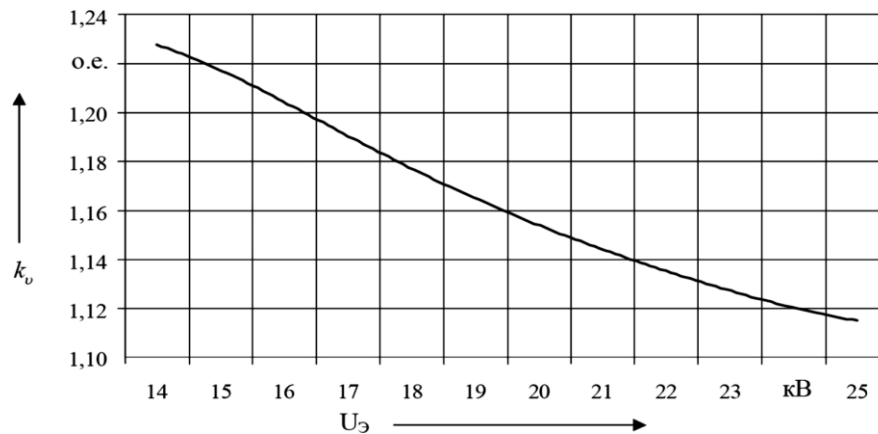


Рисунок 5.1 – Залежність коефіцієнта форми кривої напруги k_v від значення напруги на струмоприймачі

На рисунках 5.2 - 5.5 наведені енергетичні діаграми ділянки ТП-1 для електровоза ВЛ-80р і HRCS2 . Енергетичні діаграми побудовані для поїздів уніфікованого (вертикальне штрихування) і критичного (похиле штрихування) і відображають витрату $W_{п}$ і повернення $W_{р}$ електроенергії електровозом по кожному перегону даної ділянки в парному і непарному напрямках.

Всі результати розрахунків для побудови енергетичних діаграм представлені також в табличній формі і відображають по ділянці в цілому і по кожному перегону окремо довжину перегону, обсяг виконаної роботи, час ходу, питомі витрати електроенергії і рекуперацію. У Додатку «В» в табл. В.1 - В.4 представлені результати розрахунків для діаграм ділянки ТП-1 в непарному і парному напрямку.

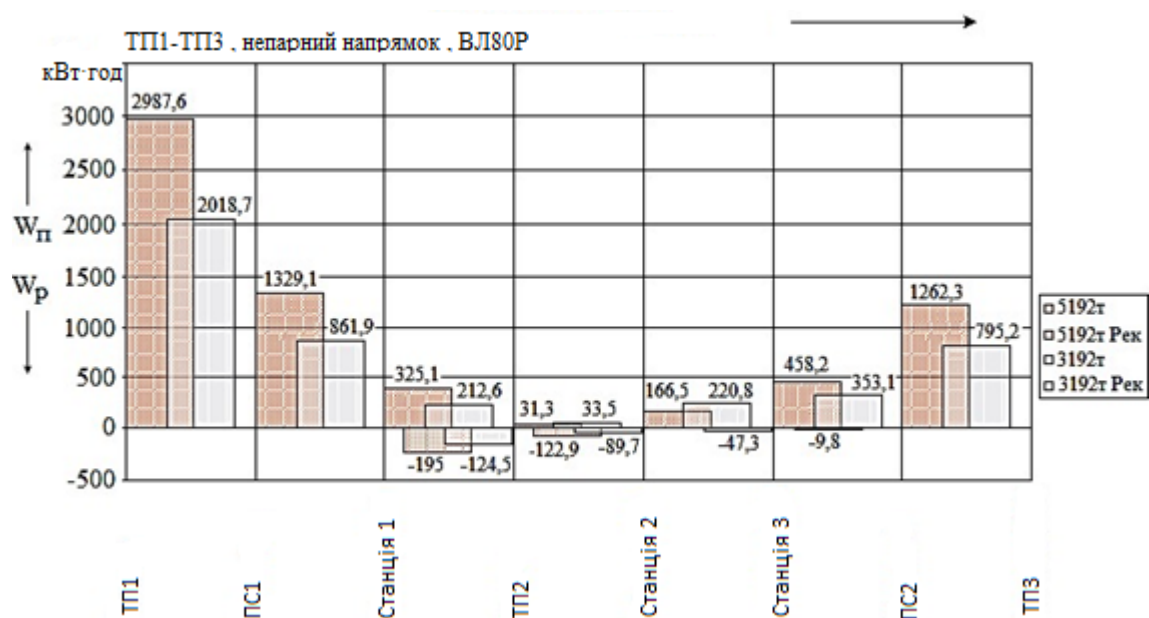


Рисунок 5.2 – Енергетичні діаграми ділянки ТП-1 для електровоза ВЛ-80р

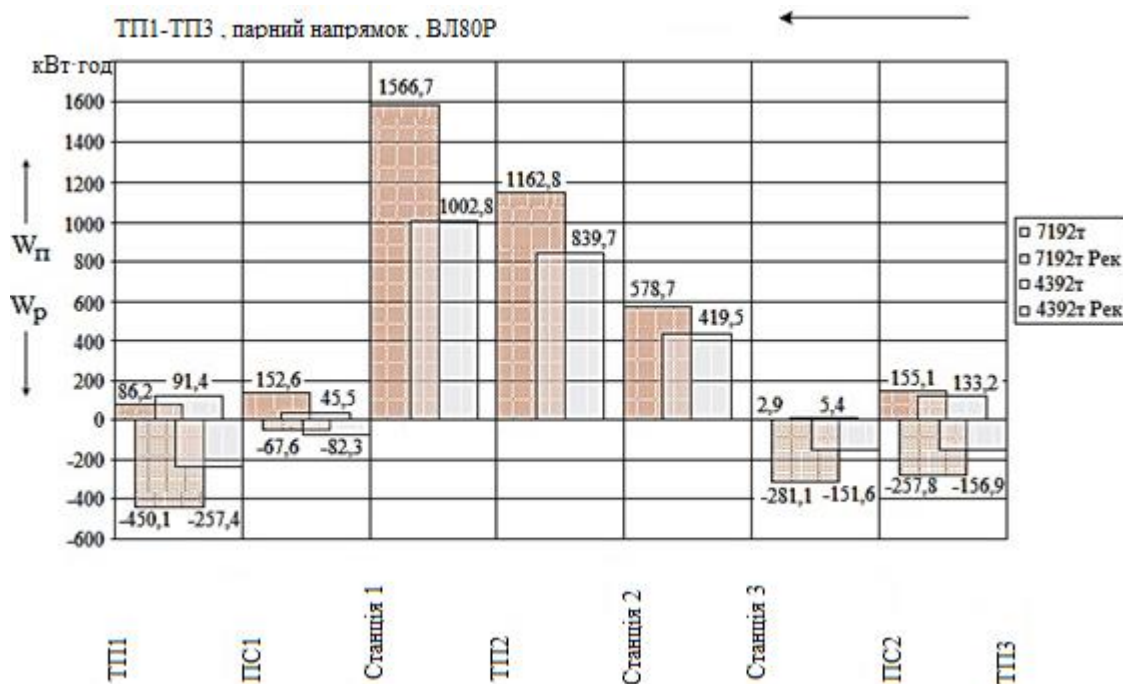


Рисунок 5.3 – Енергетичні діаграми ділянки ТП-1 для електровоза ВЛ-80р

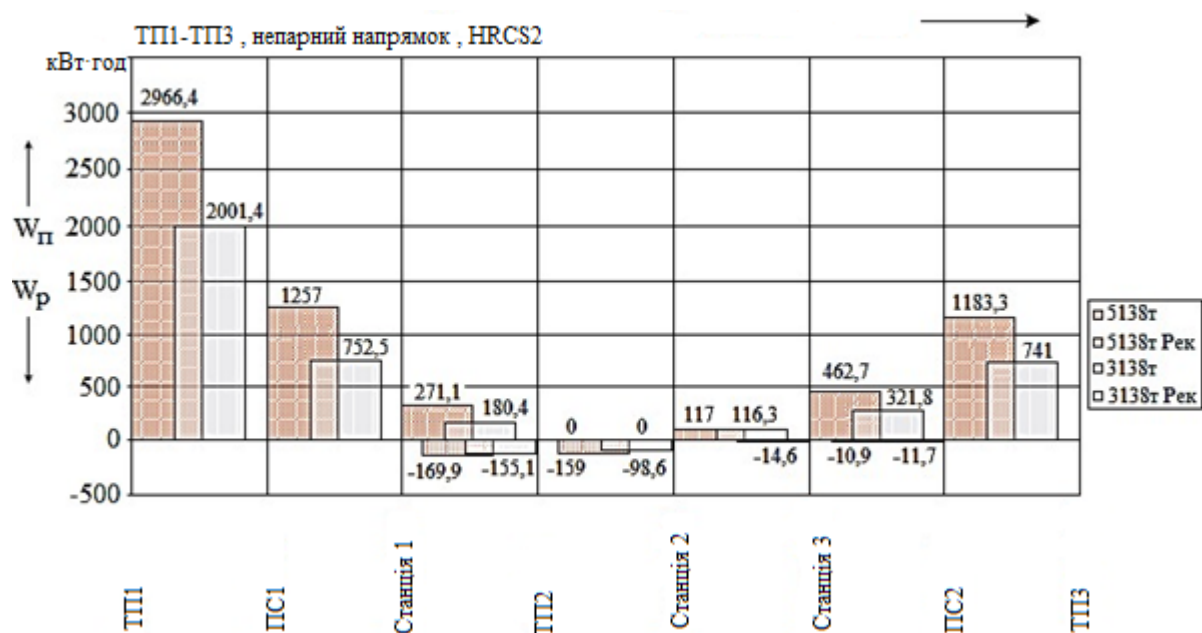
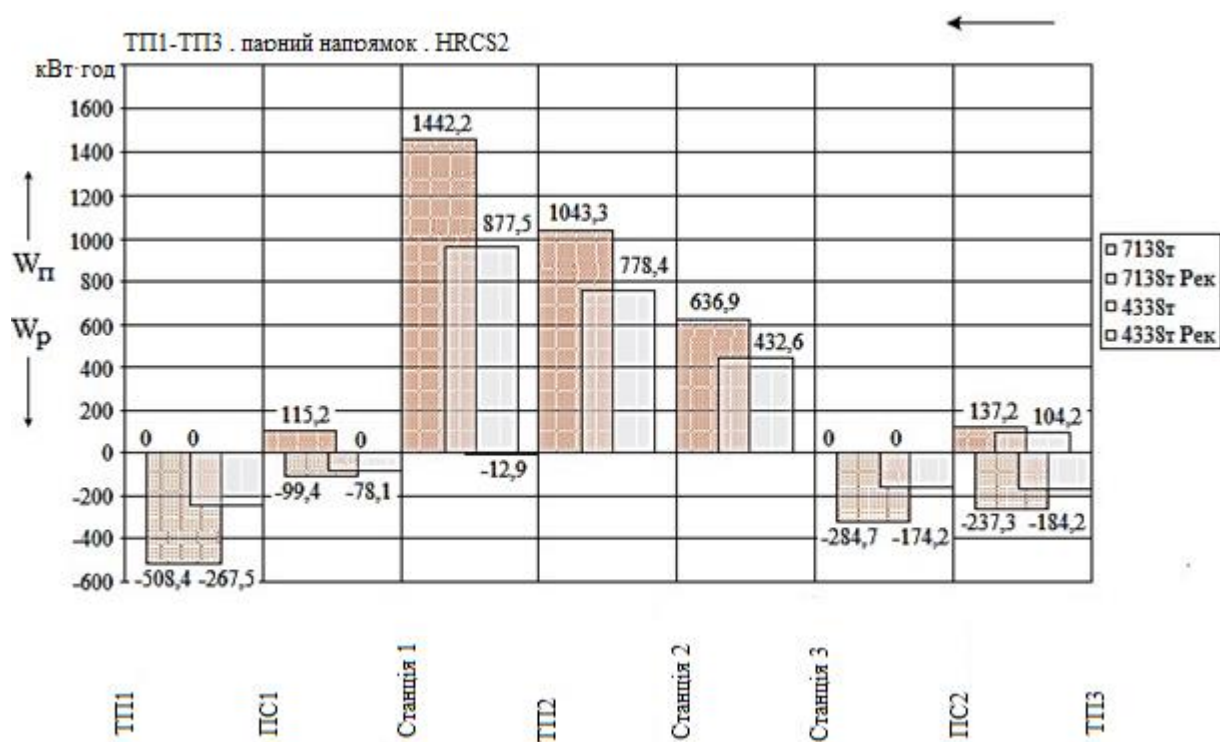


Рисунок 5.4 – Енергетичні діаграми ділянки ТП-1 для електровоза HRCS2



Рис

унок 5.5 – Енергетичні діаграми ділянки ТП-1 для електровоза HRCS2

На відміну від стаціонарних споживачів електроенергії на режим тягової навантаження впливає багато факторів: переміщення ЕРС, схема живлення тягової мережі, профіль колії ділянки, взаємне розташування поїздів на зоні живлення, маси поїздів, серія ЕРС, метеоумови, організація руху і ряд інших чинників. Наявність «вікон», пропуск поїздів підвищеної маси, згущення поїздів, викликані нерівномірністю руху, призводять до нерівномірного споживання електроенергії, появи моментів підвищеного електроспоживання. Нерівномірність розподілу поїздів по масі додатково посилює коливання навантажень на систему електропостачання.

Вищесказане підкреслює, що розрахунок системи електропостачання електричної залізниці повинен проводитися особливими методами, які враховують специфіку тягового навантаження. При цьому необхідно прагнути більш глибоко відобразити реальний стан поїздів і характер споживання ними струму.

5.2 Висновки до розділу

Електровози ВЛ-80р і HRCS2 є джерелами нелінійних спотворень напруги і струму електротягової мережі, що викликаються генеруванням перетворювачами енергії тягового електроприводу вищих гармонійних напруги і струму з частотами, що багаторазово перевищують частоту мережі 50 Гц. Спектральний склад і потужність вищих гармонійних, що визначають додаткові втрати і потужність спотворення, істотно відрізняються для електровозів з зонно-фазовим регулюванням і імпульсним управлінням. Виявлено особливість формування спектрального складу напруги і струму для різних електровозів. Найбільші спотворення по струму для перетворювачів з зонно-фазовим регулюванням, а за напругою на високих частотах для імпульсних перетворювачів 4q-S.

Якість електроспоживання електровозами з зонно-фазовим регулюванням і з імпульсним керуванням перетворювачів характеризується відмінними

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значеннями показників обміну в мережі реактивною енергією і енергією спотворення при передачі однакової по потужності активної енергії.

Інтегральним показником якості електроспоживання є коефіцієнт потужності, який оцінюється значеннями 0,84 (ВЛ-80р) і 0,98 (HRCS2). Збільшення коефіцієнта потужності електровозів HRCS2 в порівнянні з електровозами ВЛ-80 при рівній переданій активній потужності дозволяє зменшити ефективне значення струму електротягової мережі на 25-30% за рахунок компенсації реактивної енергії основної гармонійної на самому електровозі і формування струму, близького до синусоїдальної форми.

Збільшення максимальної швидкості сприяє скороченню часу ходу поїзда і тягне за собою необхідність поліпшення інфраструктури колійного господарства і електропостачання, а також супроводжується збільшенням питомої витрати електроенергії, що в свою чергу веде до зростання енергетичної складової собівартості перевезень.

Зростання швидкості руху супроводжується збільшенням питомої витрати електроенергії, що в свою чергу веде до зростання енергетичної складової собівартості перевезень.

Кількість проміжних зупинок на ділянці слід вибирати з урахуванням економічних показників витрат на збільшення питомого електроспоживання і збитків в соціальній сфері при неповному задоволенні запитів місцевого населення.

Істотним фактором є вибір кількості зупинок, відстані між ними і необхідність узгодження зі швидкісними характеристиками рухомого складу, а саме можливості досягнення ЕРС при обраному графіку руху.

В результаті багатофакторного експерименту на розрахунковій моделі визначено питоме електроспоживання для поїздів зі швидкістю до 250 км/год в умовах різної максимальної швидкості руху на заданій ділянці.

З аналізу отриманих даних встановлено, що питома витрата електроенергії збільшується при зростанні швидкості внаслідок збільшення аеродинамічного опору руху. Для горизонтальної ділянки при швидкості ЕРС 250 км/год і

					02.15.EC1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прискоренні $\alpha = 5$ км/год/с питоме електроспоживання більш ніж в 3 рази більше в порівнянні з рухом зі швидкістю 120 км/год, що відповідно становить 50,8 Вт·год/т·км і 16,01 Вт·год/т·км.

Рішення про застосування швидкісного і високошвидкісного руху для конкретної пасажирської лінії слід приймати з урахуванням організації руху і тягової потужності, встановленого електроприводу на ЕРС за критерієм мінімуму питомого електроспоживання при заданому часу руху між пунктами зупинки поїзда.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дипломна робота є науково-кваліфікаційною роботою на актуальну тему, в якій викладено теоретичні положення та науково обґрунтовані рішення в галузі залізничного тягового електропостачання на однофазному змінному струмі і містить вирішення наукового завдання в галузі інноваційних технологій транспортної енергетики, спрямованих на підвищення показників якості електроспоживання електрорухомим складом на швидкісних лініях залізниць України при змішаному графіку руху пасажирських і вантажних потягів з традиційними ЕРС і ЕРС нового покоління. У роботі зроблені наукові висновки і отримані наступні результати:

1. Виконано аналіз факторів, що знижують якість електроспоживання на лініях однофазного змінного струму і викликають нелінійні спотворення форми напруги і струму в системі електротягової мережі - ЕРС, завантаження мережі неактивними потоками електроенергії, додаткові втрати енергії і відхилення рівня напруги у струмоприймачів ЕРС від необхідних значень;

2. Розроблено методику дослідження якості електроспоживання в електротяговій мережі на лініях однофазного змінного струму, що забезпечує можливість проведення аналізу показників якості електроспоживання з урахуванням всіх енергетичних ланок зовнішнього, тягового електропостачання і ЕРС з різними типами вхідних перетворювачів однофазно-постійного струму;

3. Створена імітаційна модель, що дозволяє реалізувати нові функції обробки даних модельних вимірювань для умов застосування на ЕРС перетворювачів однофазно-постійного струму з різними алгоритмами управління в режимах тяги і рекуперативного гальмування;

4. Отримано оцінку якості і рівня питомого споживання електроенергії при роздільній і спільній експлуатації ЕРС з різними алгоритмами управління вхідними перетворювачами на ділянках залізниці з підвищеними швидкостями руху;

5. Встановлено, що при імпульсному реверсивному вхідному

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювачі з синусоїдальним ШІМ при рівній переданій потужності досягається зменшення ефективного значення струму електротягової мережі на 25...30%, зниження втрат енергії на 2...3% від потужності споживання ЕРС замість 4...5% при традиційній системі з зонно-фазовим керуванням.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Neumman K. Grunlagen der Leistungselektronik / K. Neumman Stuttgart: Treubner, 1989.
2. Агуна А.В. Управління якістю електроенергії при несинусоїдальних режимах / А.В. Агуна; СПбГМТУ. - СПб., 2009. - 134 с.
3. Алексєєв, А.С. Система автоматичного регулювання струму колекторних тягових двигунів електровоза: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Алексєєв Олексій Сергійович. - М., 2009. - 302 с.
4. Ануфрієв, І. Є. MATLAB 7. / І.Є. Ануфрієв, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 1104 с.
5. Асанбаєв Ю.А. Основи теорії енергетичних в перетворювальних установках: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н., СПб - 2002.
6. Бессонов Л.А. Теоретичні основи електротехніки [Текст]: підручник для вузів ж. - д. Транспорт / Л.А. Безсонов ;. - М.: Вища школа, 1978. 266 с.
7. Бобровников, Я.Ю. Електричні залізниці / Я.Ю. Бобровников. - Хабаровськ: Изд-во ДВГУПС, 2010. - 80 с.
8. Бородулін Б.М. Конденсаторні установки електрифікованих залізниць / Б.М. Бородулін, Л.А. Герман, Г.А Миколаїв. - М.: Транспорт, 1983. - 183 с.
9. Бурков А. Т. Електронна техніка та перетворювачі: Учеб. для вузів Ж.-Д. трансп. - М: Транспорт. 1999. - 464 с.
10. Бурков А.Т. Режим руху і особливості тягових розрахунків при визначенні навантажень на пристрої електропостачання високошвидкісних ліній. Елтранс-2011. / А. Т. Бурков, С. А. Бурков, М. А. Шарпілова. - СПб.: Петербурзький державний університет шляхів сполучення, 2013. - 584 с. - ISBN 978-5-7641-0438-6.
11. Бурков А.Т. Управління електроенергетичними процесами локомотивів з асинхронним приводом: дис. докт. тех. наук: / А.Т. Бурков. - Ленінград: ЛІЖТ Л., 1982. - 470 с.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Бурков А.Т. Електроніка та перетворювальна техніка / А.Т. Бурков.- Москва: ФГБОУ «Навчально-методичний центр по утворенню на залізничному транспорті», 2015. - 2 т. - 307 с.

13. Бурьяноватий А. І. використання пакета MATLAB-Simulink для розрахунку режимів електричних мереж / А.І. Бурьяноватий, М.А. Іванов, А.Е. Кроковиках // Електрифікація і розвиток інфраструктури енергозабезпечення тяги поїздів на залізничному транспорті: матеріали Шостого Міжнародного симпозіуму «Елтранс-2011», 25-28 жовтня 2011 року. - СПб .: ПГУПС, 2013 - 584 с.

14. Бурьяноватий А. І. Застосування пакета MATLAB в дисциплінах нового навчального плану підготовки інженерів-електромеханіків / А.І. Бурьяноватий, М.А. Іванов // Електрифікація і розвиток інфраструктури енергозабезпечення тяги поїздів швидкісного і високошвидкісного залізничного транспорту: матеріали Шостого Міжнародного симпозіуму «Елтранс-2013», 8 - 11 жовтень 2013 року. - СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 - 350 с.

15. Вільгельм А. С. Принципи побудови енергетичних діаграм для оцінки ефективності застосування рекуперативного гальмування // А. С. Вільгельм, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Известия Транссибу / Омський гос. ун-т шляхів сполучення. Омськ, 2012. № 2 (10).- с. 63 - 68.

					02.15.ЕС1927.РД.2020–ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		