

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Нерубацький Володимир Павлович

УДК 621.337.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ В РЕЖИМАХ ТЯГИ І РЕКУПЕРАЦІЇ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В. П. Нерубацький

Науковий керівник
Щербак Яків Васильович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Нерубацький В. П. Підвищення енергоефективності електричного рухомого складу в режимах тяги і рекуперації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України. Харків, 2017.

Енергозбереження в Україні на сьогоднішній день визнано одним із пріоритетних напрямів економічного розвитку держави. Особливо це стосується транспортної галузі. Укрзалізниця є потужним споживачем електроенергії у масштабах цілої держави. Близько 75 % електроенергії, що споживається Укрзалізницею, витрачається на тягові потреби електрорухомого складу (ЕРС). Одним із основних шляхів покращення енергоефективності систем тягового електроспоживання є ефективне використання режимів тяги і рекуперації електричного рухомого складу. Згідно з існуючим досвідом застосування рекуперативного гальмування дає змогу суттєво зменшити загальні тягові витрати на електроенергію. Проте на значній частині електрорухомого складу України режим рекуперативного гальмування не використовується з причини того, що електрорухомий склад у більшості випадків не оснащено системами рекуперативного гальмування, а відомі системи рекуперативного гальмування мають вхідні напівпровідникові перетворювачі, які зумовлюють значну емісію в живильну мережу вищих гармонік струму та реактивної складової потужності, що значно знижує енергоефективність системи тягового електропостачання. У зв'язку з вищесказаним, актуальним завданням є покращення енергоефективності та показників електромагнітної сумісності ЕРС із системою тягового електропостачання шляхом удосконалення вхідних перетворювачів ЕРС.

Досвід експлуатації систем рекуперативного гальмування на електрорухомому складі постійного струму свідчить про нестабільність його систем автоматичного керування, що є причиною нестабільності процесу рекуперації і, як наслідок, у ряді випадків – вигорання обмоток тягових двигунів. Для забезпечення стабільності процесу рекуперації запропоновано реалізувати оптимізацію параметрів САР на предмет максимальної швидкодії системи керування шляхом впровадження замкненої двоконтурної системи автоматичного регулювання, що реалізує процес регулювання струмів обмотки збудження з виконанням умов процесу кінцевої тривалості. Внутрішній контур розробленої двоконтурної системи автоматичного керування служить для демпфування впливу сталої часу на динамічні процеси в обмотці збудження тягового електродвигуна. Зовнішній контур забезпечує динамічні процеси в якірному колі електродвигуна та астатизм системи в статичному режимі. Встановлено, що максимальна швидкодія залежить від значення фактора пульсацій, який змінюється в широкому діапазоні. Для забезпечення максимальної швидкодії системи керування запропоновано впровадження спостерігача значення фактора пульсацій системи та адаптивного перерахунку значення параметра регулятора K_p для забезпечення умов процесу кінцевої тривалості та максимальної швидкодії при змінних значеннях фактора пульсацій.

Для електрорухомого складу змінного струму перспективним є застосування у складі електрорухомого складу активних чотириквADRантних випрямлячів (4QS) з корекцією коефіцієнта потужності, що дасть змогу в значній мірі покращити показники якості електричної енергії та показників електромагнітної сумісності (EMC) ЕРС у режимах тяги і рекуперації. Проте алгоритми керування 4QS-перетворювачами потребують подальшого удосконалення.

У роботі виконано аналіз існуючих систем рекуперативного гальмування на ЕРС постійного і змінного струмів. Виявлено їх недоліки та можливі шляхи удосконалення систем автоматичного керування процесу рекуперації.

Отримано аналітичні вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості при регулюванні струму обмотки збудження тягового двигуна постійного струму в режимі рекуперації з метою отримання максимальної швидкодії системи регулювання та забезпечення її стабільності. Проведене імітаційне моделювання автоматичного регулювання струму обмотки збудження підтвердило отримані теоретичні результати реалізації максимальної швидкодії.

Виконано розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача на основі гістерезисної модуляції. Визначено регулювальні характеристики та залежності значень діапазону частот комутації від регулювального параметра системи керування ζ та величини вхідної індуктивності. Проведене імітаційне моделювання підтвердило отримані теоретичні результати реалізації максимальної швидкодії.

Виконано розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача EPC на основі двосторонньої ШІМ-модуляції. Визначено аналітичні вирази, що описують залежність спектрів вхідного струму та вихідної напруги 4QS-перетворювача, як функцію від частоти живильної мережі та частоти опорного сигналу двосторонньої ШІМ.

Виконано розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача EPC на основі компенсаційних методів із двосторонньою ШІМ, які дозволяють отримати покращений гармонічний склад загального вхідного струму електровоза за рахунок синхронізації систем керування окремих перетворювачів та зсуву опорних сигналів ШІМ в окремих каналах один відносно одного на певний електричний кут, що дає ефект зсуву вищих гармонік та реалізації взаємної компенсації вищих гармонік у загальному спожитому струмі.

Визначено залежності компенсаційних кутів від числа паралельно працюючих мостів та типу застосованої модуляції. Отримані теоретичні результати були підтверджені імітаційним моделюванням у середовищі MATLAB SIMULINK.

Ключові слова: електротранспорт, енергоефективність, умови процесу кінцевої тривалості, 4QS-перетворювач, гістерезисна модуляція, широтно-імпульсна модуляція, компенсація вищих гармонік.

Nerubatskyi V. P. Increases the energy efficiency of electric rolling stock in traction and regenerative braking modes. – Qualification research work as a manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of speciality 05.22.09 – electric transport. Ukrainian State University of Railway Transport MES of Ukraine, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv MES of Ukraine. Kharkiv, 2017.

Today, in Ukraine, the sharp rise in the cost of electricity is facing. Ukrainian railway is a powerful consumer of electricity throughout the country. At the same time, about 75 % of the electricity consumed by Ukrainian railway is spent on the traction needs of the electromotive equipment. One of the leading ways to improve the energy efficiency of traction power systems is the efficient use of traction and recovery modes of electric rolling stock. According to the existing experience of applying recuperative inhibition, it is possible to significantly reduce the total traction energy costs. However, in a significant part of the electromotive composition of Ukraine, the regenerative braking regime is not used because the electromotive composition in most cases is not equipped with recuperative braking systems, and existing regenerative braking systems cause significant emissions in the feeding network of higher harmonics and reactive power component, which significantly reduces its Energy efficiency In connection with the foregoing, the actual task is to develop the latest energy-efficient traction and recovery systems. The experience of operating the systems of recuperative braking on the electromotive force (EMF) of direct current indicates the instability of its automatic control systems, which is the reason for the instability of the recovery process and, as a consequence, in some cases, the burning of the windings of traction engines. In order to ensure the stability of the recovery process, it is proposed to realize the

optimization of the parameters of the SAR for the subject of the maximum speed of the control system by introducing a closed two-circuit automatic control system that implements the process of regulation of the excitation winding currents with the fulfillment of the conditions of the process of finite durability. The internal contour of the developed two-circuit automatic control system serves to damping the influence of the constant time on the dynamic processes in the excitation winding of the traction electric motor. The external contour provides dynamic processes in the anchor circle of the electric motor and static system in the static mode. It is established that the maximum speed depends on the value of the pulsation factor, which varies over a wide range. In order to ensure maximum performance of the control system, it was proposed to introduce the observer's value of the pulsation factor of the system and the adaptive conversion of the value of the K_r parameter controller value to provide conditions for the process of finite duration and maximum performance at variable values. For electromotive alternatives, the use of active four-quadrant rectifiers (4QS) with a power factor correction is promising, which will greatly improve the quality of electrical energy and EMF indices in traction and recuperation modes. However, 4QS-converter control algorithms need further improvement. In the work the analysis of existing systems of recuperative inhibition on the EMF of constant and alternating currents is made. Their drawbacks and possible ways of improving the systems of automatic control of the recovery process are revealed. The analytical expressions describing the conditions of the process of finite duration in the regulation of the current of the excitation winding of the traction motor of a direct current in the mode of recovery in order to obtain the maximum speed of the control system and ensure its stability are obtained. A simulated simulation of the automatic control of the current of the excitation winding has been carried out, confirmed the obtained theoretical results of the implementation of maximum speed. The development and research of the control system of the input 4QS-converter based on hysteresis-modulation is carried out. The control parameters and dependences of the values of the switching frequency range on the control parameter ζ and the input inductance values are determined.

The conducted simulation confirmed the obtained theoretical results of the implementation of maximum speed. The development and research of the control system of the input 4QS-converter of EMF on the basis of two-way PWM modulation is executed. The analytical expressions describing the dependence of the input current and output voltage spectrum of the 4QS converter, as a function of the frequency of the feeding network and the frequency of the reference signal of the bilateral PWM, are determined. The development and research of the control system of the input 4QS-converter of the EMF on the basis of two-way PWM compensating methods is obtained, which allow obtaining an improved harmonious composition of the total input current of the electric locomotion by synchronizing the control systems of individual transducers and shifting the reference PWM signals in separate channels with respect to one another on a particular electric The angle that gives the effect of shifting higher harmonics and the implementation of the mutual compensation of higher harmonics in the total current consumed.

The dependence of compensating angles on the number of parallel working bridges and the type of modulation used is determined. The obtained theoretical results were confirmed by simulation simulation in MATLAB SIMULINK environment.

Key words: electric transport, energy efficiency, conditions of the process of finite duration, 4QS-converter, hysteresis modulation, broadband impulse modulation, compensation of higher harmonics.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нерубацький В. П. Визначення оптимального за рівнем енергоспоживання керування тяговим двигуном електрорухомого складу залізниць постійного струму / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 59-64.

2. Щербак Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 2. – С. 30-34.

3. Нерубацький В. П. Збільшення кількості енергії рекуперації при застосуванні електричного гальмування на шкідливих ухилах / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 6. – С. 27-30.

4. Щербак Я. В. Вибір раціональних режимів ведення поїздів з метою зниження витрат електроенергії на тягу / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 5. – С. 16-19.

5. Щербак Я. В. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 137-142.

6. Нерубацький В. П. Рекуперативне гальмування на залізничному транспорті як один з видів енергозбереження в системі тяги змінного струму / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 2. – С. 11-15.

7. Щербак Я. В. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 1. – С. 58-63.

8. Щербак Я. В. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 5-12.

9. Нерубацький В. П. Зниження витрат електроенергії на тягу шляхом оптимізації руху поїздів / В. П. Нерубацький // XXXV научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. Ч. 2. Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2010. – С. 35-36.

10. Нерубацький В. П. Удосконалення процесу рекуперації енергії в системі тягового електропостачання залізниць постійного струму / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010». Т. 1. Транспорт, Туризм и рекреация. Физическое воспитание и спорт. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 28-30.

11. Нерубацький В. П. Застосування MathCad для розв'язання оптимізаційної задачі керування рухом поїзда / В. П. Нерубацький // Матеріали докладів 23-й міжнародної конференції «Перспективні комп'ютерні, управляючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (Алушта, 2010) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 5-6. – С. 84-85.

12. Нерубацький В. П. Розробка математичної моделі для розрахунку енергооптимальних траєкторій руху поїзда / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010». Т. 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 48-49.

13. Нерубацький В. П. Пошук оптимальних законів керування тяговим електроприводом електрорухомого складу в режимах тяги та електричного гальмування / В. П. Нерубацький, Я. В. Щербак // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. – Сер. «Техніка, технологія». – К.: ДЕТУТ, 2011. – С. 112-113.

14. Нерубацький В. П. Імітаційне моделювання руху електровоза постійного струму при різних режимах його роботи / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической

конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Т. 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 20-21.

15. Нерубацький В. П. До питання електромагнітної сумісності системи «електровоз – контактна мережа» / В. П. Нерубацький // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХІХ міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I (01-03 червня 2011 р., Харків) / за ред. проф. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 252.

16. Нерубацький В. П. Проблеми застосування рекуперативного гальмування на залізниці / В. П. Нерубацький // II Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з міжнародною участю «Інноваційні технології на залізничному транспорті»: збірник наукових праць конф., 15-17 вересня 2011 р., м. Красний Ліман / відп. ред. Н. Б. Чернецька-Білецька. – Луганськ: СНУ імені В. Даля, 2011. – С. 75-78.

17. Нерубацький В. П. Визначення допустимої області керування електровозом постійного струму в режимі рекуперативного гальмування / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011». – Одесса: Черноморье, 2011. – Вып. 4. Т. 3. – С. 60-62.

18. Нерубацький В. П. Розробка імітаційної моделі для вирішення рівняння руху поїзда / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2012». – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – Вып. 1. Т. 2. – С. 44-45.

19. Нерубацький В. П. Аналіз існуючих критеріїв для дослідження стійкості систем рекуперативного гальмування / В. П. Нерубацький // Збірник тез ХІІ науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки». – Ч. 1. – К.: ДЕДУТ, 2012. – С. 180-181.

20. Нерубацький В. П. Аналіз динамічних характеристик системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування / В. П. Нерубацький // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 72 Международной научно-практической конференции (19-20 апреля 2012 г., Днепропетровск). – Днепропетровск: ДИИТ, 2012. – С. 98-99.

21. Нерубацький В. П. Рациональне використання енергії рекуперації в системі тягового електропостачання / В. П. Нерубацький // 77 міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». – Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – Т. 1. – С. 88.

22. Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування / В. П. Нерубацький // III Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. – С. 112-114.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОВИТРАТ ТА ШЛЯХІВ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ НА ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМІВ ...	26
1.1. Аналіз складових енерговитрат та ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях України	26
1.2. Вибір раціональних режимів ведення поїздів з метою зниження витрат електроенергії на тягу	36
1.3. Шляхи покращення систем рекуперативного гальмування для електрорухомого складу постійного і змінного струмів	40
1.4. Висновки до першого розділу	55
РОЗДІЛ 2. ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	57
2.1. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі рекуперативного гальмування	57
2.2. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання рекуперативним гальмуванням	71
2.3. Імітаційне моделювання динамічних характеристик двоконтурної системи автоматичного регулювання двигуна постійного струму	78
2.4. Висновки до другого розділу	82
РОЗДІЛ 3. РЕГУЛЮВАЛЬНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З ГІСТЕРЕЗИСНИМ КЕРУВАННЯМ ВХІДНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ	84

3.1. Система керування вхідного перетворювача ЕРС на основі гістерезисної модуляції	84
3.2. Методика розрахунку частот комутації активного 4QS-перетворювача напруги з гістерезисною модуляцією	90
3.3. Регульовальна характеристика активного 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування	104
3.4. Імітаційне моделювання 4QS-перетворювача з гістерезисною модуляцією	107
3.5. Висновки до третього розділу	120
РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З ШІМ-КЕРУВАННЯМ ВХІДНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ	
122	
4.1. Одноканальна система керування 4QS-перетворювачем на основі двосторонньої ШІМ	122
4.2. Двоканальна система керування 4QS-перетворювачем на основі двосторонньої ШІМ.....	125
4.3. Імітаційне моделювання енергетичних показників ЕРС з вхідним 4QS-перетворювачем на основі одноканальної ШІМ	127
4.4. Імітаційне моделювання енергетичних показників ЕРС з вхідним 4QS-перетворювачем на основі двоканальної ШІМ	132
4.5. Висновки до четвертого розділу	136
РОЗДІЛ 5. ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ КОМПЕНСАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК У ВХІДНИХ 4QS-ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ІЗ ФАЗОЗСУНУТОЮ ШІМ	
138	
5.1. Схеми паралельних компенсованих вхідних 4QS-перетворювачів ЕРС змінного струму	138
5.2. Система керування компенсаційного 4QS-перетворювача з багатоканальною фазозсунутою ШІМ	142

5.3. Дослідження тягового електропривода ЕРС змінного струму з двома компенсаційними 4QS-перетворювачами в середовищі імітаційного моделювання	145
5.4. Висновки до п'ятого розділу	157
ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	161
ДОДАТОК А.....	182
ДОДАТОК Б.....	183
ДОДАТОК В.....	184
ДОДАТОК Г.....	185
ДОДАТОК Д.....	186

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АН – автономний інвертор напруги
- АТД – асинхронний тяговий двигун
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
- ВІП – випрямно-інверторний перетворювач
- ДПС – двигун постійного струму
- ЕМС – електромагнітна сумісність
- ЕРС – електрорухомий склад
- КГС – коефіцієнт гармонічних спотворень (англ. THD – Total Harmonic Distortion)
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- КП – коефіцієнт потужності
- ПКТ – процеси кінцевої тривалості
- РІФ – регулювання імпульсно-фазове
- САР – система автоматичного регулювання
- СК – система керування
- СЦБ – сигналізація, централізація, блокування
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція
- ШІП – широтно-імпульсний перетворювач

ВСТУП

Актуальність теми. Енергозбереження в Україні на сьогоднішній день визнано одним із пріоритетних напрямів економічного розвитку держави. Особливо це стосується транспортної галузі. Укрзалізниця є потужним споживачем електроенергії у масштабах цілої держави. Близько 75 % електроенергії, що споживається Укрзалізницею, витрачається на тягові потреби електрорухомого складу (ЕРС). Одним із основних шляхів покращення енергоефективності систем тягового електроспоживання є ефективне використання режимів тяги і рекуперації електричного рухомого складу. Згідно з існуючим досвідом застосування рекуперативного гальмування дає змогу суттєво зменшити загальні тягові витрати на електроенергію [10, 11, 47, 58]. Проте на більшій частині електрорухомого складу України режим рекуперативного гальмування не використовується з причини того, що ЕРС не оснащено системами рекуперативного гальмування. При тому слід зауважити, що значна частина ЕРС зі встановленими системами рекуперативного гальмування не використовує його з причини фізичної зношеності обладнання або нестійкості режиму рекуперації. Таким чином, питання модернізації існуючих систем рекуперативного гальмування та розробка нових є актуальною науково-технічною задачею.

У системі тяги змінного струму рекуперативне гальмування застосовується з 1955 р., коли промисловість почала випускати електровози серії НО, що працювали на ртутних керованих вентилях. Починаючи з 1962 р., вітчизняна силова перетворювальна техніка отримала якісно новий напрям розвитку, заснований на широкому застосуванні силових напівпровідникових приладів (діодів, тиристорів). Перші електровози, в яких застосовувались тиристорні випрямлячі, виникли наприкінці 60-х років минулого століття [60, 106, 111, 143]. З появою керованих напівпровідникових випрямлячів значно розширилися сфери застосування перетворювальних пристроїв для створення оптимальних умов генерування, передачі і розподілу електричної енергії.

Залежно від умов роботи залізниць та характеристик електрорухомого складу існують параметри оцінки ефективності рекуперативного гальмування та рекомендації до його застосування. Питання надійності і раціональності режимів рекуперації вивчалися із самого початку застосування даного виду гальмування на полігоні залізниць вченими країн СНД [10, 11, 31, 49, 66, 94, 96], а також вченими багатьох розвинутих країн світу.

Передумовою до постановки і теоретичною базою для вирішення проблеми підвищення техніко-економічних показників системи тягового електропостачання змінного струму і питань енергозбереження стали фундаментальні праці вчених у галузі електрифікації залізниць [16, 40, 41, 51, 56, 64, 65, 101]. Вагомий внесок у дослідження застосування рекуперативного гальмування належить роботам [36, 49, 58, 107, 108, 111, 114].

Вперше рекуперативне гальмування було застосоване в системі тяги постійного струму в середині 50-х років і з тих пір достатньо ефективно застосовується на Придніпровській, Донецькій, Львівській регіональних філіях ПАТ «Укрзалізниця».

Вирішення проблем, що пов'язані з підвищенням ефективності рекуперативного гальмування та його застосуванням на електрорухомому складі залізниць, і досі є актуальною задачею для наукових досліджень як в Україні [5, 9, 58, 110, 121, 126], так і за її межами. Так, в Японії, науково-дослідним інститутом залізничної техніки (*RTRI*) з метою уникнення перешкод обмеження по напрузі, що виробляється тяговими двигунами в генераторному режимі під час регулювання швидкості поїздів від максимальної практично до нульової, запропоновано метод усунення цих обмежень за рахунок введення в коло додаткових резисторів [47]. У [172] автором розглянуто теоретичні і технічні аспекти електродинамічного гальмування, яке є особливо актуальним у швидкісному русі, коли швидкість досягає 400...500 км/год (такий рухомий склад на сьогодні випробовується в Німеччині та Японії). Також запропоновано метод регулювання гальмівного зусилля шляхом безконтактного керування опором гальмівного реостату (за допомогою

напівпровідникового перетворювача). Вченими України розглядається використання конденсаторних батарей при рекуперативному гальмуванні як додаткового джерела енергії [92] та застосування систем на базі мікроконтролерів, здатних з метою підвищення ефективності рекуперативного гальмування формувати задані форми гальмівних характеристик [113].

Питанням покращення енергоефективності електрорухомого складу шляхом поліпшення якості електроенергії в режимах тяги і рекуперації присвячені роботи відомих вчених, зокрема Шидловського А. К., Козлова А. В., Солодунова А. М., Гончарова Ю. П., Панасенка М. В., Жемерова Г. Г., Буткевича О. Ф., Волкова І. В., Долбні В. Т., Домніна І. Ф., Жежеленка І. В., Новського В. А., Щербака Я. В. Серед іноземних вчених слід зазначити Akagi H., Dixon J. W., Hernandez J., Kanazawa Y., Kolar J., Nabae A., Moran L., Pontt J., Rodr'iguez J., Silva L., Tsukamoto Y., Ziogas P. та інших.

На даний час для систем тягового електропривода з двигунами постійного струму режим рекуперативного гальмування досягається шляхом регулювання струму обмотки збудження тягових двигунів, чим досягається регулювання генераторного режиму тягових двигунів. При цьому існуючі системи автоматичного регулювання процесу рекуперації на вітчизняному ЕРС постійного струму в ряді випадків виходять за межі стійкості, що призводить до виникнення аварійних ситуацій з вигоранням обмоток збудження. Таким чином, розробка системи автоматичного регулювання процесу рекуперації на ЕРС постійного струму є актуальною задачею.

Більш складними є системи рекуперативного гальмування на електрорухомому складі змінного струму, де для реалізації режиму рекуперативного гальмування має бути встановлений вхідний перетворювач з двонапрявленою передачею електричної енергії. При цьому велике значення має не тільки кількість рекуперованої енергії, а і її якість [4, 25, 28-30, 39, 45, 62, 74]. Вхідні напівпровідникові перетворювачі на вітчизняному електрорухомому складі (ВЛ80Р, ЕР9Р, ЕР9Т та інші) реалізують процес рекуперативного гальмування зі значним вмістом вищих гармонік струму, які у

свою чергу викликають додаткові втрати в системі тягового електропостачання та можуть бути причиною помилкових спрацювань у системі залізничної автоматики, що може спричинити аварії на залізниці.

Для розв'язання вказаних задач для електрорухомого складу постійного струму запропоновано розробку стійких до зміни режимів тяги регуляторів режиму рекуперації з забезпеченням максимальної швидкодії з дотриманням астатизму в процесі регулювання та забезпечення процесу кінцевої тривалості (ПКТ). Для електрорухомого складу змінного струму пропонується впровадження активних чотириквadrантних (4QS) перетворювачів, значною перевагою яких є реалізація синусоїдальної форми спожитих струмів у режимі тяги і рекуперації з низьким вмістом вищих гармонік (коефіцієнт гармонічних спотворень спожитих струмів менше 5 %) та реалізованим коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці (> 99 %). Проте системи керування цими перетворювачами є недостатньо вивченими і потребують подальшого дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) згідно з Державною цільовою програмою реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки (Постанова Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р.) та Стратегією розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16.01.2009 р. № 1555-р.

Науково-дослідні роботи за темою дисертації за участю здобувача проводилися на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту за такими темами: «Поліпшення якості електричної енергії на виході випрямної установки тягової підстанції постійного струму» (ДРН 0111U002244); «Оптимізація витрат електричної енергії рухомим складом з напівпровідниковими перетворювачами» (ДРН 0115U000281).

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення енергетичної ефективності режимів тяги і рекуперації електричного рухомого складу постійного і змінного струмів шляхом упровадження новітніх систем керування (СК) напівпровідниковими перетворювачами.

Для досягнення мети в дисертації поставлено такі задачі:

- провести аналіз існуючих систем рекуперативного гальмування на ЕРС постійного і змінного струмів. Виявити їх недоліки та можливі шляхи удосконалення;

- отримати аналітичні вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості в системі автоматичного регулювання (САР), що регулює струм якоря тягового двигуна постійного струму (ДПС) в режимі рекуперації, з метою отримання максимальної швидкодії цієї САР. Провести імітаційне моделювання;

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача на основі покращеної гістерезисної модуляції. Визначити регульовальні характеристики та залежність середньої на періоді частоти комутації силових ключів від уставки гістерезису СК та параметрів силової частини. Виконати розробку імітаційних моделей та провести дослідження параметрів якості електричної енергії 4QS-перетворювача в режимах випрямлення, який відповідає режиму тяги ЕРС, та рекуперації;

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача ЕРС на основі двосторонньої ШІМ-модуляції. Визначити аналітичні вирази, що описують залежність спектрів вхідного струму та вихідної напруги 4QS-перетворювача, як функцію від частоти живильної мережі, частоти ШІМ та електричних параметрів перетворювача (активний опір вхідного дроселя, індуктивність вхідного дроселя, ємність вхідного фільтра);

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача ЕРС на основі компенсаційних методів з двосторонньою ШІМ. Визначити значення компенсаційних кутів.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні процеси в електричних колах вхідних перетворювачів ЕРС.

Предмет дослідження. Силкові кола та системи автоматичного регулювання вхідних перетворювачів ЕРС, що забезпечують покращені енергетичні показники в режимах тяги і рекуперації.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися: класична теорія електричних кіл; математичний апарат Z-перетворення; метод параметричного формування процесу кінцевої тривалості; чисельні методи розв'язання систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів і характеристик; методи рядів Фур'є для визначення величини гармонік випрямленої напруги і струму мережі; частотні методи теорії автоматичного керування для синтезу передавальної функції регулятора вихідної напруги, а також імітаційне моделювання перетворювачів із запропонованими системами керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше отримано аналітичні вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості при регулюванні струму обмотки якоря тягового двигуна постійного струму, який живиться від тиристорного випрямляча чи широтно-імпульсного перетворювача в режимі електричного гальмування, які дають змогу отримати оптимізовану за критерієм швидкодії систему автоматичного регулювання.

2. Вперше отримано регулювальну характеристику 4QS-перетворювача ЕРС змінного струму з гістерезисною системою керування, яка визначає залежність вихідної напруги від параметрів живильної мережі, регулювального коефіцієнта ξ і струму навантаження і дає можливість виконувати регулювання вихідної напруги із забезпеченням стійкості процесів випрямлення і рекуперації в зазначеному діапазоні струму навантаження.

3. Вперше запропоновано покращений алгоритм гістерезисної модуляції 4QS-перетворювача, який шляхом додавання в алгоритм комутації станів силових ключів, що спричиняють одночасне вмикання пар ключів VT1-VT3 та

VT2-VT4, дає можливість знизити число комутації силових ключів та динамічні втрати в активному випрямлячі до 33 %.

4. Отримано залежність середньої на періоді частоти комутації силових ключів 4QS-перетворювача з базовою гістерезисною системою керування у функції струму навантаження, параметрів силової схеми, значення живильної напруги і значення регулювального коефіцієнта системи керування ξ , яка дає змогу оцінити втрати потужності в перетворювачі та визначити його ККД.

5. Набули подальшого розвитку компенсаційні системи керування вхідними 4QS-перетворювачами ЕРС змінного струму, які за рахунок синхронізації паралельних каналів керування та взаємного зсуву опорних ШІМ-сигналів на заданий електричний кут дозволяють отримати ефект взаємної компенсації вищих гармонік струмів, спожитих тяговим приводом, чим досягається покращання показників електромагнітної сумісності та зменшення додаткових втрат у системі тягового електропостачання від вищих гармонік, та дають змогу знизити частоту комутації силових ключів, що збільшує коефіцієнт корисної дії електричного рухомого складу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що теоретичні та експериментальні дослідження формують науково-технічну базу для створення нових систем електричного гальмування. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання при модернізації та розробленні нового електрорухомого складу з метою підвищення якості застосування рекуперативного гальмування. Практичну цінність підтверджено актами про впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при підготовці бакалаврів і магістрів за освітніми програмами «Електричний транспорт» та «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці фахівців служб

електропостачання та локомотивного господарства, сигналізації та зв'язку (відділ СЦБ), інженерів, начальників дільниць, старших електромеханіків СЦБ; Харківського центру професійної освіти регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» при проведенні занять під час отримання робітничих професій «Електромонтер з ремонту та обслуговування пристроїв сигналізації, централізації і блокування», «Електромонтер зв'язку», «Поїзний електромеханік». Результати дисертаційної роботи були використані під час розроблення перетворювачів частоти та імпульсних джерел живлення з корекцією коефіцієнта потужності, що виконувались співробітниками ТОВ «ВО ОВЕН» (м. Харків). Основні результати дисертаційної роботи передані для використання до регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», що підтверджується відповідними актами впровадження, які наведені в додатках А–Д до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати, подані в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз систем рекуперативного гальмування тягового електропривода ЕРС постійного та змінного струмів; умови реалізації граничної швидкодії САР електричним гальмуванням; розроблення методики розрахунку коефіцієнта корисної дії 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування залежно від струму навантаження, значення вхідної індуктивності, амплітуди живильної напруги, ємності вихідного конденсатора та значення регулювального коефіцієнта системи керування ζ ; визначення регулювальної характеристики вихідної напруги 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування залежно від параметрів живильної мережі, регулювального коефіцієнта ζ та струму навантаження (вихідної потужності); отримання аналітичних виразів, що описують залежність спектрів вхідного струму та вихідної напруги 4QS-перетворювача із системою автоматичного регулювання на основі двосторонньої ШІМ-модуляції.

За темою дисертації опубліковано 22 наукових роботи, з них 6 – у співавторстві. У [136] здобувачем проаналізовано критерії оптимізації та

головні результати досліджень у сфері оптимізації руху поїзда з енергетичної точки зору. У [137] визначено особливості, переваги та недоліки застосування рекуперативного гальмування на залізницях України. У [138] досліджено зниження витрат електроенергії на тягу поїздів за рахунок застосування бортового комп'ютера та вибору раціональних режимів ведення поїздів при заданому часі ходу поїзда по дільниці та впливі швидкісних обмежень. У [139] здобувачем отримані аналітичні вирази для фактора пульсацій, які дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного гальмування для систем з тиристорним випрямлячем та з широтно-імпульсним перетворювачем. У [140] отримано умови процесу кінцевої тривалості системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування. У [141] визначено оптимальні закони керування тяговим електроприводом електрорухомого складу залізниць постійного струму, розроблено математичні моделі, які підтвердили перспективність використання принципу максимуму для синтезу оптимального керування поїздом у режимах тяги та електричного гальмування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на Міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференціях «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010» (Одесса: Черноморье, 2010); «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» (Алушта, 2010); «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010» (Одесса: Черноморье, 2010); «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ: ДЕГУТ, 2011); «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011» (Одесса: Черноморье, 2011); Міжнародних науково-технічних конференціях кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн

(Харків: УкрДАЗТ, 2010, 2011); «Інформаційна техніка, електромеханіка та електротехніка» (ІТЕМЕТ-2011) (Луганськ, 2011); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків: НТУ «ХП», 2011); «Інноваційні технології на залізничному транспорті» (м. Красний Лиман, 2011); «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011» (Одесса: Черноморье, 2011); «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (Одесса, 2012); «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» (Київ: ДЕТУТ, 2012); «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днепропетровск: ДИИТ, 2012); «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків: УкрДАЗТ, 2015); «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017); «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків: УкрДУЗТ, 2017), а також на щорічних семінарах НАН України «Проблеми перетворення електроенергії у системах електричного транспорту» (Харків, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 22 наукових публікаціях, з них: 8 статей у наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз), 14 опубліковані в тезах доповідей і матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації становить 186 сторінок основного тексту, включаючи: 91 рисунок по тексту, 10 таблиць по тексту, 195 найменувань використаних джерел інформації на 21 сторінці, 5 додатків на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЕНЕРГОВИТРАТ ТА ШЛЯХІВ ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ НА ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМІВ

1.1. Аналіз складових енерговитрат та ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях України

На сьогодні залізниця – найбільш економічний вид транспорту. Серед усіх видів транспорту вона має мінімальні значення питомої витрати паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виконаної роботи. Незважаючи на існуючу низьку питому енергоємність залізничного транспорту, потенціал економії експлуатаційних витрат за рахунок скорочення витрати палива і енергії в галузі і сьогодні вельми істотний, а можливість активно впливати на нього за допомогою технологічних і технічних новацій дуже велика. У заходах щодо енергозбереження криється значний потенціал підвищення експлуатаційної ефективності функціонування залізниць. З урахуванням прогнозованого зростання цін на енергоресурси робота в цих напрямках стає ще актуальнішою. Рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів у локомотивному господарстві залежить від економічності тягового рухомого складу, ефективності його використання та, в значній мірі, відповідності вибраного режиму ведення поїздів раціональному. У зв'язку з цим завдання розроблення методик оперативного розрахунку раціональних режимів ведення поїзда з урахуванням його характеристик і реальних умов експлуатації є нагально важливим.

В умовах зростаючого енергетичного дефіциту і постійного зростання тарифів на енергоресурси недовикористання такого важливого резерву енергозбереження в перевізному процесі, як рекуперативне гальмування, є неправомірним. Проте сьогодні можливості рекуперації використовуються далеко не повністю. Про це свідчить аналіз обсягів рекуперації електричної енергії на залізницях України [126, 137, 144]. Останнім часом повернення

електроенергії не перевищує 2,21 % від її споживання і щорічно знижується. Впродовж останніх років цей показник у середньому не перевищує 1,71 % (рисунок 1.1).

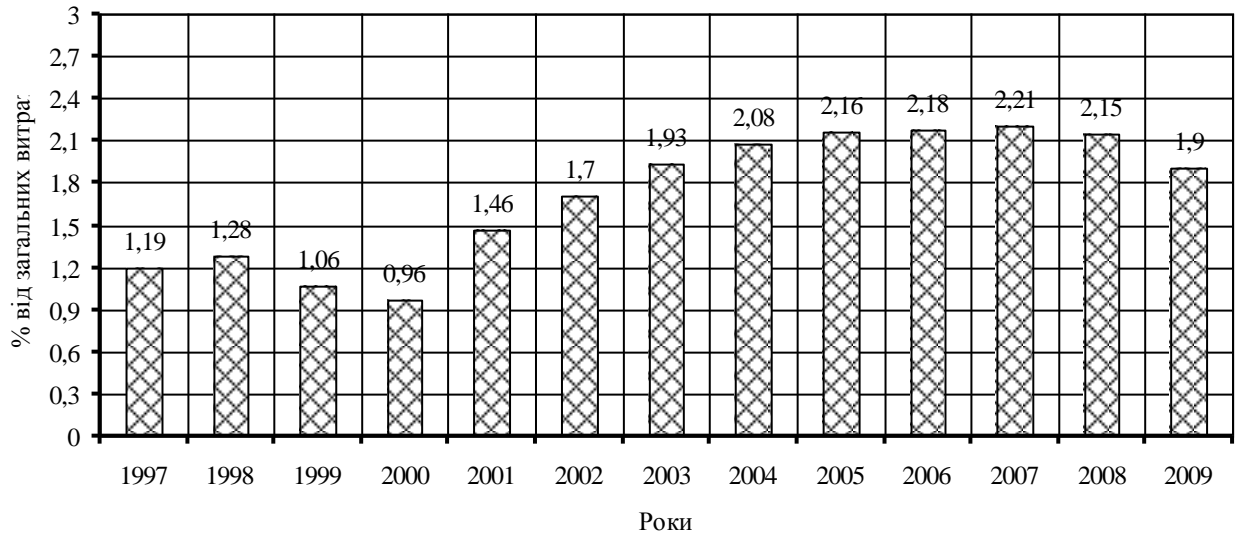


Рисунок 1.1 – Динаміка повернення енергії рекуперації за роками

Фактичний розподіл поверненої електроенергії на залізницях України [43] дає змогу детально проаналізувати ситуацію, що склалася. Одна з причин, що стримує застосування рекуперативного гальмування, – велике число локомотивів з несправними схемами рекуперації і необладнаних ними спочатку. Якщо практично всі вітчизняні вантажні електровози постійного струму (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11), які зараз працюють на залізницях України, оснащені схемами рекуперативного гальмування [66], то 15 % експлуатованого парку машин змінного струму взагалі не мають електричного гальмування, на 60 % є тільки реостатне гальмування і лише 25 % мають рекуперативне гальмування (ВЛ65, ВЛ80^P, ВЛ80^{TK}).

Несправність схеми рекуперативного гальмування може бути викликана такими причинами:

- порушення регулювання захисних реле та електричних апаратів через вібрацію, втрати пружності регулювальних пружин або з інших причин;

- інтенсивне зношення окремих бандажів колісних пар через неправильну експлуатацію електровоза. При цьому різниця в характеристиках колісно-моторних блоків може бути значною;

- різниця між характеристиками перетворювачів при спільній роботі двох електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 через неякісне регулювання або після заміни перетворювача;

- ослаблення регулювальних хомутиків і наявність слідів електрокорозії резисторів. При цьому опір резисторів може значно змінюватися.

Зазначені причини призводять або до зниження ефективності застосування рекуперативного гальмування, або до частих відмов схем у роботі. Тому постійний контроль за надійною роботою схем рекуперативного гальмування має першорядне значення.

Рекуперативним і реостатним гальмуванням обладнані також і відносно нові електровози постійного струму ДЕ1 виробництва ДП «НВК «Електровозобудування». За період 1998–2007 рр. Укрзалізницею було придбано 40 електровозів, 23 з яких експлуатуються на Придніпровській залізниці та 17 – на Донецькій. У 2007–2008 рр. Укрзалізниця придбала нові уніфіковані вантажні електровози ВЛ11 М/5-М/6 потужністю 4600 кВт та конструкційною швидкістю 100 км/год виробництва Тбіліського електровозобудівного заводу, які також обладнані схемами рекуперативного гальмування.

Щодо електрорухомого складу залізниць змінного струму, то, починаючи з 2004 р. Укрзалізницею було придбано 18 вантажно-пасажирських електровозів змінного струму ДС3 спільного виробництва ДП «НВК «Електровозобудування» з німецьким концерном «Сіменс АГ», обладнаних рекуперативним гальмуванням. На даний час вони експлуатуються в пасажирському русі в локомотивному депо Київ-Пасажирський Південно-Західної залізниці.

Загалом, відповідно до комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 рр., Укрзалізницею планується

придбати 174 електровози змінного струму для вантажних перевезень та 199 електровозів змінного струму для пасажирських перевезень.

Випрямні електровози ВЛ80^P і ВЛ65 здійснюють перетворення однофазного струму в пульсуючий за допомогою однофазних (двонапівперіодних) випрямлячів, що виконуються за мостовою схемою. В даний час на заміну електровозам ВЛ80^P і ВЛ65 приходять електровози з більш кращими силовими характеристиками вентилів, що мають значно більший ресурс перемикачів. Більш досконаліші перетворювачі дозволяють застосовувати рекуперативне гальмування не тільки на затяжних і значних за величиною ухилах, але і короткочасно, на відносно невеликих за протяжністю і ухилом ділянках залізниць.

При вирішенні питання реалізації рекуперативного гальмування виникають питання її оптимізації за певним критерієм: швидкодії, максимуму поверненої енергії, забезпечення заданої стійкості процесу регулювання та інші.

Перспектива розширення полігону застосування рекуперативного гальмування неминуче призведе до загострення проблем якості електричної енергії, що висуває питання правильної оцінки, прогнозу і моніторингу показників якості електричної енергії на перше місце. Більш ніж п'ятдесятирічний досвід використання рекуперативного гальмування дав змогу виявити основні техніко-економічні переваги електричної тяги з рекуперацією [50, 58, 66, 69, 71, 83]:

- зниження питомої витрати електроенергії на тягу поїздів за рахунок її повернення в контактну мережу і зниження витрати на власні потреби електровоза;

- підвищення технічної швидкості руху за рахунок особливостей характеристик рекуперативного гальмування – підтримка постійної швидкості на спусках (замість її перепадів при поєднанні режимів пневматичного гальмування і вибігу);

- збільшення середньодобового пробігу і продуктивності локомотива за рахунок зростання технічної швидкості, а також зниження часу простою локомотива з поїздом на станціях обробки (немає масової заміни колодок);

- підвищення пропускної спроможності ділянок залізниць за рахунок підвищення швидкості на спусках, зниження часу обробки складів після спуску;

- прискорення обороту локомотивів і вагонів і, у зв'язку з цим, зниження їх потреби;

- підвищення безпеки руху поїздів за рахунок наявності в поїзді додаткового засобу гальмування;

- економія електричної енергії при рекуперативному гальмуванні;

- економія гальмівних колодок, зниження витрат на їх заміну;

- економія на обточуванні колісних пар;

- зниження забруднення колійного баласту і апаратури поїзда металевим пилом – поліпшення так званого «гігієнічного» стану колії, що дає змогу вирішувати, крім суто технічних, ще й екологічні проблеми.

Крім того, система енергозабезпечення Львівської залізниці дає змогу повертати електричну енергію, вироблену електровозами при застосуванні рекуперативного гальмування, безпосередньо в систему зовнішнього енергоспоживання. На інших залізницях у даний час електрична енергія має бути використана іншим локомотивом у межах дії тягової підстанції або погашена в реостатах [12, 65]. Водночас підвищення рівня вищих гармонік зворотного тягового струму в рейках при рекуперації потенційно збільшує рівень перешкод на пристрої автоматичної локомотивної сигналізації і на рейкові ланцюги, що може призвести до зростання економічних втрат через можливі непланові зупинки і затримки поїздів після відмов систем СЦБ.

Слід зазначити переваги застосування рекуперативного гальмування на змінному струмі в порівнянні із системою постійного струму:

- повернена в процесі рекуперації енергія завжди знаходить споживача або на тяговій ділянці, або з первинного боку тягового трансформатора;

- рекуперуючий рухомий склад системи змінного струму не підвищує напругу на пантографі, забезпечуючи тим самим нормальні умови для роботи двигунів у рекуперативному і тяговому режимах;

- при низьких технічних швидкостях руху ефективність рекуперації зберігається;

- рекуперативне гальмування при низьких швидкостях руху автоматично і плавно переходить у режим гальмування протиструмом, зберігаючи гальмівне зусилля до повної зупинки поїзда.

Проте застосування рекуперативного гальмування вносить ряд негативних особливостей у роботу системи тягового електропостачання:

- завантажуючи мережу значними реактивними струмами, електровоз знижує напругу тягової мережі, що негативно позначається на інших електровозах, що працюють у тяговому режимі, – в деяких випадках це може призводити до зниження пропускної спроможності ділянки;

- негативна дія на залізничну колію (зсув рейко-шпальної решітки характерний для рекуперативного гальмування в цілому);

- особливості роботи випрямно-інверторних перетворювачів рекуперуючих електровозів істотно впливають на показники якості електричної енергії [116, 117, 126], які являють собою окремий комплекс проблем: знижена якість електроенергії негативно позначається не тільки на роботі самої електрифікованої лінії, але і на роботі споживачів, підключених до неї, що потребує внесення додаткових фільтрокомпенсуючих пристроїв [23, 33, 35, 46, 53, 67, 91].

Найважливішим завданням у напрямі підвищення ефективності рекуперації є правильне визначення частки внеску кожного споживача (електрорухомого складу в режимі тяги або рекуперації) в погіршення якості електричної енергії. Тому вкрай важливо відстежувати якість електричної енергії в усіх проміжних ланках системи – починаючи із струмоприймача електрорухомого складу і закінчуючи стиком із зовнішньою системою електропостачання.

Разом із незаперечними позитивними якостями, застосування рекуперативного гальмування вносить ряд негативних чинників у роботу системи тягового електропостачання змінного струму [21, 51]. Правильна оцінка впливу як тяги, так і рекуперативного гальмування на показники роботи системи зростає в одне з необхідних завдань щодо оцінки ефективності електричної тяги. Для підвищення ефективності електрифікації на змінному струмі в системі тягового електропостачання широко застосовуються різні пристрої і засоби, що підвищують якість і знижують втрати електроенергії: пристрої поперечної і подовжньої ємкісної компенсації, пункти паралельного з'єднання, вольтододатні пристрої, різні способи підсилення тощо [6, 9, 11, 13, 27, 30]. Питанням визначення оптимальних параметрів засобів підвищення показників якості електричної енергії і забезпечення належного рівня електромагнітної сумісності приділялася велика увага в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених, проте, питання підвищення якості електроенергії безпосередньо на електрорухомому складі з урахуванням застосування рекуперативного гальмування в належній мірі не вирішені і потребують істотного уточнення. Забезпечення стабільної якості електричної енергії на лініях змінного струму дасть змогу підвищити ефективність застосування рекуперативного гальмування, а також збільшити повернення електроенергії з $5\div 8$ до $7\div 10$ % і більше [51].

На ділянках залізниць з важким гірським профілем шляху і великим вантажопотоком тяговий режим характеризується безперервною зміною електричних навантажень контактної мережі та тягових підстанцій, що викликає різкі коливання напруги, яка підводиться до електровозів.

Комплексна оцінка впливу всіх чинників у загальному техніко-економічному ефекті від застосування рекуперації дозволяє виявити найбільш ефективні умови її використання. Були визначені також граничні показники застосування електричного гальмування, відпрацьовані схеми і режими водіння поїздів, що забезпечують найменшу негативну дію рекуперації на суміжні господарства.

Дослідженню впливу режимів роботи поїздів на живильну мережу присвячена значна кількість робіт вчених СНД [97, 98, 107, 115, 141]. Якщо прийняти сумарну економію від застосування рекуперативного гальмування за 100 %, то 53 % припадає на економію електроенергії і 47 % на економію в системі автогальм. Додаткові ж витрати на ремонт електровозів і верхньої будови колії при використанні рекуперації складають 48 % [54]. Таким чином, економія на автогальмах (47 %) практично покриває експлуатаційні витрати, а економічний ефект досягається за рахунок повернення електровозом електричної енергії в контактну мережу.

З огляду на те що вантажообіг на електрифікованих ділянках останнім часом зростає, ефективність використання рекуперативного гальмування важко переоцінити. Резервами збільшення кількості електроенергії, що повертається в контактну мережу при застосуванні рекуперативного гальмування, є:

- відновлення та своєчасне і якісне налагодження схем рекуперативного гальмування на електрорухомому складі;
- підтримання оптимального рівня напруги в контактній мережі;
- організація максимального використання електроенергії рекуперації іншими електровозами та електропоїздами;
- модернізація тягових підстанцій постійного струму для забезпечення рекуперації енергії контактної мережі постійного струму в живильну мережу змінного струму.

У суміжних господарствах Укрзалізниці має бути вжито заходів щодо зменшення негативного впливу рекуперативного гальмування на експлуатаційні показники. Так, у колійному господарстві необхідно створювати посилені колійні конструкції, в локомотивному і електропостачанні – компенсувати реактивну потужність і знижувати гармонічний склад струму рекуперації. У господарстві автоматики, телемеханіки та зв'язку слід підвищувати захисну спроможність рейкових ланцюгів СЦБ від перешкод. У ряді випадків, можливо, доведеться відійти від

типових конструкцій і пристроїв і ухвалити нестандартні рішення, орієнтовані для застосування на ділянках стійкої рекуперації енергії. Сумарно подібне призводить до зниження на $0,5\div 0,7\%$ питомої витрати електроенергії на тягу поїздів.

Додаткове зростання повернення енергії рекуперації на 2% по відношенню до електроенергії, що споживається на тягу поїздів, орієнтовно дає економічний ефект, який протиставляється економічному ефекту від зниження кількості пошкоджень високовольтного устаткування електрорухомого складу, що виникає від перенапружень. У перспективі на основі досягнень фундаментальної науки ефективність рекуперації з погляду економії електричної енергії може бути доведена до $30\div 40\%$, а в цілому, по енергії, що споживається від енергосистеми, – до $10\div 15\%$ [51].

Природно, коли в умовах енергодефіциту ведеться всемірний пошук альтернативних джерел енергії (вітер, сонце, біопаливо, диверсифікація вугілля тощо), нехтувати таким потужним джерелом, як оборотна кінетична енергія поїзда, не можна. Реостатне гальмування, на жаль, переводить її в тепло, що йде на обігрів атмосфери. Застосуванню рекуперації має сприяти впровадження сучасних високоенергоємних накопичувачів енергії, які найближчими роками можуть бути доступні для систем тягового електропостачання залізниць.

Українські залізниці мають у своєму розпорядженні широкі можливості для розширення полігону рекуперації завдяки тому, що профіль шляху залізниць України має в основному рівнинно-горбистий тип із достатньо великою кількістю малих ухилів (рисунок 1.2) [52].

Необхідно створювати галузеву програму з питань широкого використання рекуперативного гальмування на залізницях України. Придніпровська залізниця – потенційно одна з найефективніших по полігону рекуперації і в той же час одна з перших, що наближена до граничних умов цієї ефективності через високе заповнення пропускних спроможностей.

Проблеми погіршення показників якості електричної енергії, що виникають при застосуванні рекуперативного гальмування, вимагають детальної оцінки і пошуку шляхів їх вирішення. Одночасно з розвитком науково-технічного прогресу, розширенням експериментальної бази, появою нових методів досліджень виникає необхідність розроблення заходів, що дають змогу прогнозувати і своєчасно виявляти проблемні з погляду показників якості електричної енергії режими роботи системи тягового електропостачання.

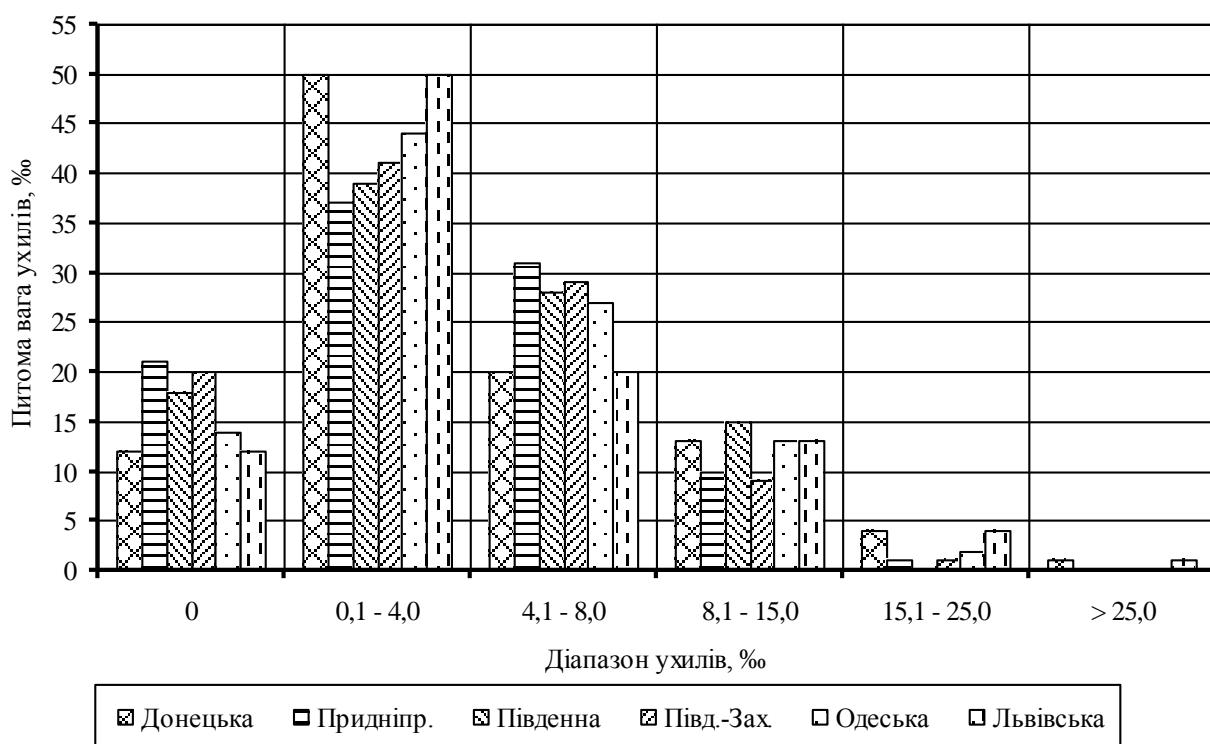


Рисунок 1.2 – Розподіл ухилів на залізницях України

В існуючих складних економічних умовах особливо необхідним є якісний моніторинг показників якості електричної енергії. Контроль якості електричної енергії важливий не тільки на стадії оперативного контролю (в процесі експлуатації), але і на стадії проектування, що дасть змогу проводити вибір оптимальних режимів енергоспоживання на міжпідстанційних зонах і розробляти захисні пристрої з урахуванням застосування рекуперативного гальмування. Такий підхід пояснюється потребою забезпечити необхідний

рівень електромагнітної сумісності і якості електричної енергії при мінімальних матеріальних витратах.

Розроблення нових способів керування процесом рекуперативного гальмування на електрорухомому складі залізниць неможливе без опрацювання нових систем керування або модернізації існуючих. Цьому об'єктивно сприяє сучасний розвиток елементної бази: поява швидкодіючих мікроконтролерів з широкими можливостями для програмування, IGBT елементів на значні струми та напруги.

Таким чином, завдання подальшого підвищення ефективності рекуперативного гальмування має вирішуватись, з одного боку, шляхом розширення полігону його застосування, з іншого – шляхом удосконалення самої системи рекуперації.

1.2. Вибір раціональних режимів ведення поїздів з метою зниження витрат електроенергії на тягу

Існуючі на сьогодні алгоритми керування поїздом передбачають розрахунок програм ведення поїзда безпосередньо на локомотиві, тобто в реальному часі. Очевидно, що апаратна реалізація таких алгоритмів можлива лише при використанні таких засобів обчислювальної техніки, як мікропроцесори та мікро-ЕОМ [55]. За наявності комп'ютерів машиністи отримують можливість вести поїзди точно за графіком і одночасно забезпечувати мінімальну витрату електроенергії, використовуючи резерви часу, передбачені графіком руху, якщо ці резерви не були вичерпані унаслідок збоїв. Оптимізація ведення навіть за наявності численних обмежуючих умов (топология ділянки шляху, втрати енергії в тягових агрегатах і допоміжному устаткуванні тощо) дозволяє знизити споживання електроенергії більш ніж на 10 %, що вельми важливо. Для практичної реалізації такої оптимізації і отримання значущого ефекту необхідне широке застосування на мережі залізниць України енергооптимальних режимів керування рухом поїздів.

Аналіз інформаційних джерел, опублікованих у нашій країні та за кордоном, показав, що резерви економії енергоресурсів на тягу поїздів ще не вичерпані, а використання раціональних режимів ведення поїздів є основним фактором зниження їхньої витрати [73, 85, 113, 136–138]. Найшвидше, але з найбільшою витратою електроенергії, можна провести поїзд по ділянці, застосовуючи такі режими (рисунок 1.3, траєкторія руху 1):

- розгін і рух при максимальній силі тяги до досягнення максимальної допустимої швидкості;
- тривалий рух з максимальною допустимою швидкістю;
- гальмування з максимальною допустимою гальмівною силою, що починається в найостанніший момент.

При моделюванні руху поїзд вважається матеріальною точкою з масою, зосередженою в центрі поїзда. Це так званий енергоємний режим ведення поїзда. Інші режими (рисунок 1.3, траєкторії руху 2, 3, 4, 5) вимагають більшого часу на проходження ділянки і, отже, більших його резервів.

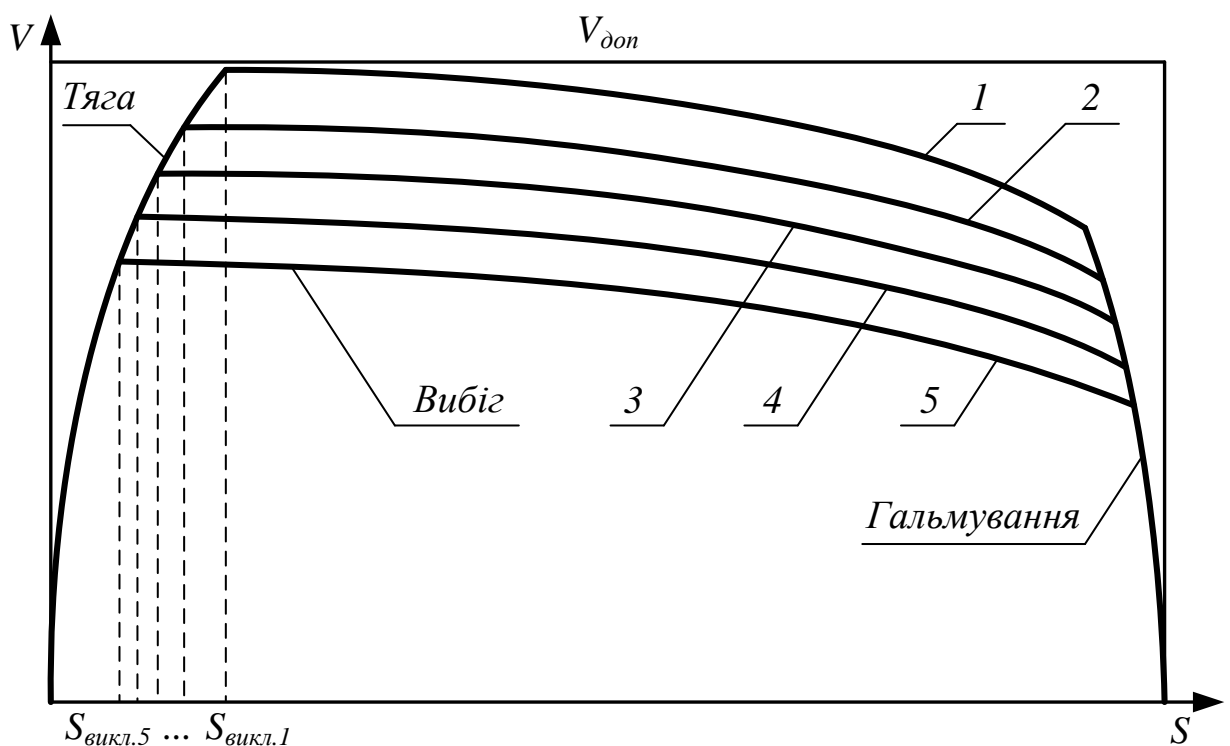


Рисунок 1.3 – Траєкторії руху поїзда для різних часів ходу

Досягнення заданого часу ходу поїзда по перегону досягається вибором координати виключення тягових двигунів електровоза $S_{\text{викл.1}}$, $S_{\text{викл.2}}$, $S_{\text{викл.3}}$, $S_{\text{викл.4}}$, $S_{\text{викл.5}}$. Знизити витрату енергії на тягу можна такими режимами:

- зменшенням сили тяги, а отже, зниженням як прискорення при розгоні, так і швидкості руху;

- повним відключенням тяги, що припускає використання кінетичної енергії при русі в гористій місцевості і перехід у режим вибігу перед гальмуванням;

- зниженням гальмівної сили;

- застосуванням рекуперативного гальмування.

Економія енергії при будь-якому режимі ведення поїзда залежить від наявних резервів часу. Якщо резерви часу неприпустимо малі, завжди можна перейти на енергоємний режим ведення. Зрозуміло, економія енергії зростає зі збільшенням резервів часу, причому можливості вказаних режимів різні. При малих резервах часу застосування вибігу перед гальмуванням забезпечує значну економію енергії. Проте по мірі зростання резервів часу збільшується економія, яку дає зниження максимальної швидкості. Найбільша економія енергії забезпечується умілим комбінуванням різних режимів ведення за допомогою бортового комп'ютера.

Для розрахунку оптимального режиму ведення бортовий комп'ютер повинен мати у своєму розпорядженні таку інформацію:

- регламентована швидкість, опір руху на підйомах, у кривих і в тунелях;
- використовувані величини сил тяги і гальмування, допустимі прискорення і уповільнення, втрати енергії в електроустаткуванні;

- маса поїзда, повний опір руху.

Окрім гальмування для зупинки поїзда на станціях, на деяких перегонах застосовується гальмування для зниження швидкості перед обмеженнями швидкості.

На рисунку 1.4 подано картину допустимих швидкостей на перегоні, де $V_{\text{дон1}} \div V_{\text{дон5}}$ – рівні допустимих швидкостей, $S_1 \div S_5$ – координати зміни рівнів

допустимих швидкостей. Для зниження швидкості поїзда до $V_{дон3}$ застосовується пригальмовування.

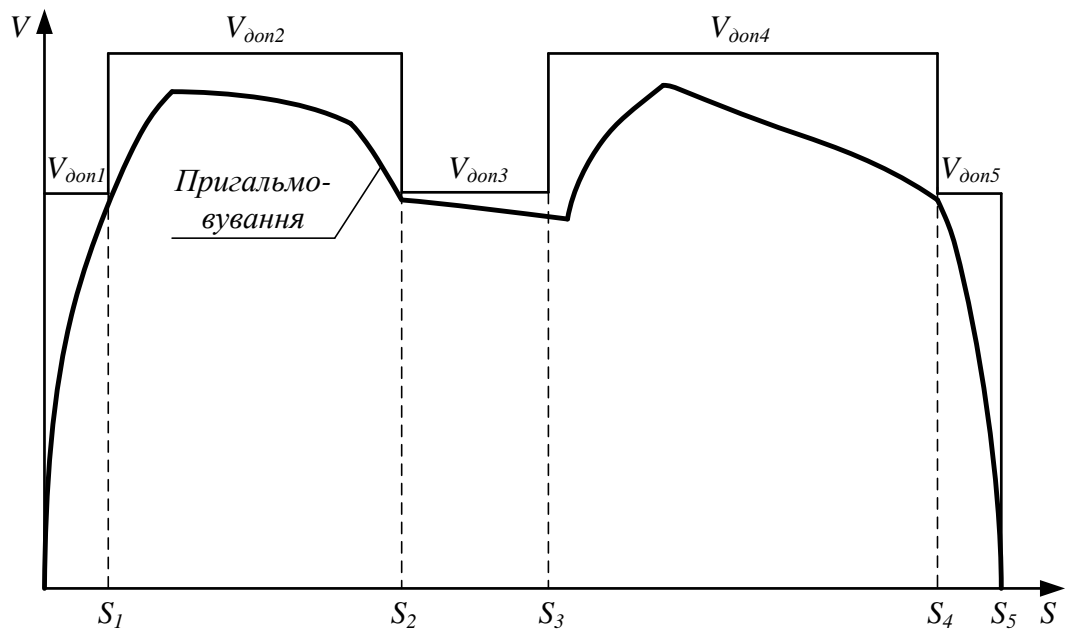


Рисунок 1.4 – Допустимі швидкості руху на перегоні

До методики і засобів розрахунку висуваються такі вимоги:

- облік всіх існуючих режимів ведення поїзда, можливість аналізу їх довільних комбінацій, висока швидкість обчислень;
- надійність обчислювальної техніки, оптимальні умови взаємодії людини і машини, можливість пошуку якнайкращого компромісного рішення в межах, що визначаються ризиком запізнення і очікуваною величиною економії енергії.

Проблема енергозбереження залізниць – це комплексна проблема, тому, окрім застосування бортового комп'ютера та вибору раціональних режимів ведення поїздів, зниження енергоємності залізничного транспорту України має полягати у проведенні докорінної модернізації діючого парку, наприклад, в удосконаленні електровозів шляхом введення регулювання швидкості обертання вентиляторів охолодження електричних двигунів залежно від реалізованої ними сили тяги; оснащенні тепловозів новими, менш затратними дизелями тощо.

Не слід забувати про такий важливий напрямок енергозбереження на залізниці, як рекуперація електроенергії, при застосуванні якої електроенергія повертається в контактну мережу [10, 49, 50].

При використанні математичних методів оптимізації керування рухом поїздів потрібні розроблення і вдосконалення алгоритмів їх розв'язання, автоматизація розрахунків, розроблення спеціальних програм для ЕОМ. Розраховані в результаті траєкторії руху поїзда мають бути експериментально перевірені як у частині можливості їх реалізації машиністами, так і в досягненні економії енергії, зручними у використанні машиністами в реальних поїздах. Результати енергооптимальних розрахунків можуть використовуватися машиністами у вигляді енергооптимальних траєкторій, наведених на режимних картах, що враховують особливості ділянок обертання поїздів, характеристики поїзда, а також умови пропуску поїздопотоків.

1.3. Шляхи покращення систем рекуперативного гальмування для електрорухомого складу постійного і змінного струмів

У режимі електричного гальмування на ЕРС постійного струму система автоматичного регулювання струму тягових двигунів забезпечує стабілізацію струму якоря відповідно до заданого значення шляхом регулювання струму збудження. Задавання струму якоря двигунів здійснюється машиністом через рукоятку контролера машиніста.

Реалізація процесу рекуперації на змінному струмі технічно є більш складною технічною задачею, ніж на постійному, що зумовлюється додатковою необхідністю оснащення вхідних реверсивних випрямлячів, до яких висуваються вимоги не тільки за параметрами високого ККД, а й вимоги забезпечення високих показників електромагнітної сумісності [7, 8, 86].

Приклад принципової силової схеми сучасного електровоза, який отримує живлення від тягової мережі змінного струму, з вхідним перетворювачем, автономним інвертором напруги та асинхронним тяговим

двигуном подано на рисунку 1.5, на схемі якого $B1$ і $B2$ позначені вхідні перетворювачі, які при живленні від постійного струму використовуються як гальмівні перемикачі, що задіюють опори $R1$ і $R2$ відповідно замість одного IGBT-модуля. Вторинні обмотки тягового трансформатора використовуються при живленні на постійному струмі як мережеві фільтри. Елементи $L1$, $L2$ і $C1$ являють собою дроселі і конденсатор у складі резонансного фільтра, що замикає на собі гармоніку струму з частотою 100 Гц.

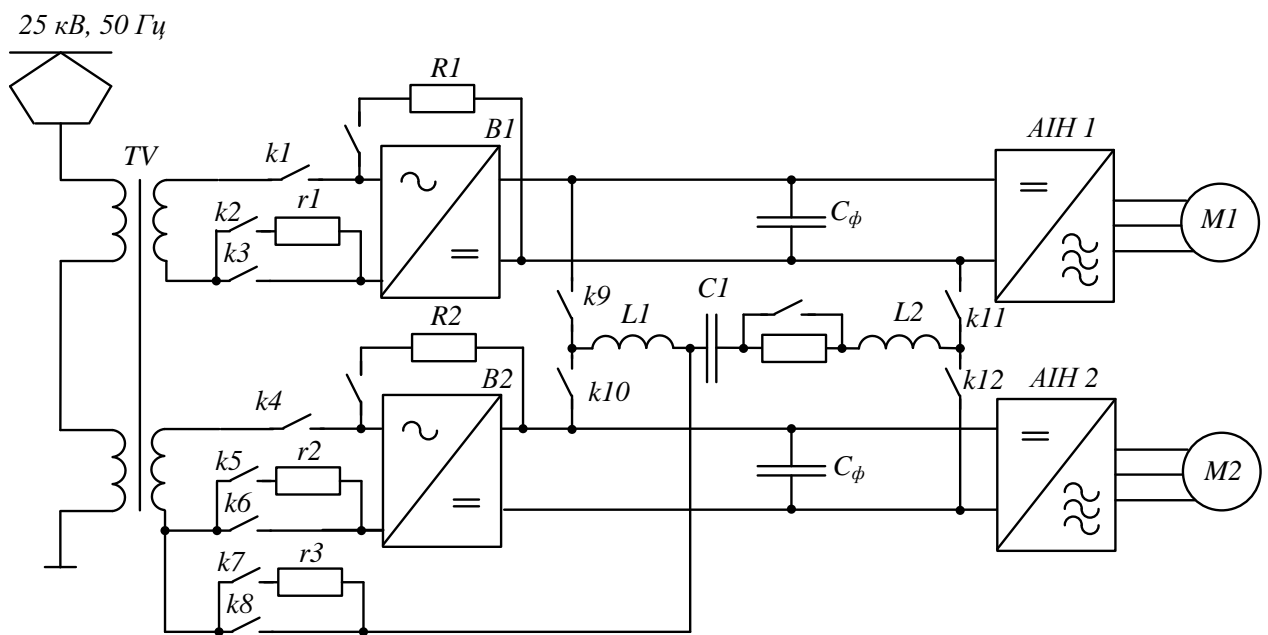


Рисунок 1.5 – Загальна структурна схема тягового привода ЕРС змінного струму

Конденсатори C_ϕ – це проміжні ланки постійної напруги, на яких вхідні перетворювачі підтримують постійну напругу. $AIH1$ і $AIH2$ позначені вихідні перетворювачі, які являють собою автономні інвертори напруги (АІН) і здійснюють регулювання АТД. Резистори $r1$, $r2$ використовуються як обмежувачі струму при заряді конденсаторів C_ϕ для першого і другого перетворювачів і $C1$ відповідно [47].

Після зарядки конденсаторів постійної ланки і резонансного фільтра замкнуті контактори $k1$, $k3$, $k4$, $k6$, $k9$, $k10$, $k11$, $k12$. Відповідно вхідні перетворювачі $B1$ і $B2$ підключені вхідними затискачами до вторинних

обмоток тягового трансформатора, а до їх вихідних затискачів через резонансний фільтр $C1-L1-L2$ і проміжну ланку постійної напруги підключені вихідні перетворювачі (АН) з АТД.

Головною проблемою ЕРС змінного струму є підвищення енергетичних показників, таких як ККД і коефіцієнт потужності. Низькі значення коефіцієнта потужності вказують на велику величину реактивної потужності, призводять до зниження пропускної спроможності ліній електропередачі, збільшення падіння напруги в тяговій мережі і неповного використання потужності всієї системи тягового енергопостачання. Крім того, використання традиційних випрямлячів змінної напруги, що працюють на індуктивне навантаження, супроводжується значним спотворенням струму в мережі живлення, що погіршує ЕМС електрорухомого складу з системою енергопостачання та електричними колами залізничної автоматики [37]. Тому розвиток вхідних перетворювачів був постійно пов'язаний з бажанням підвищити енергетичні показники; щоб їх поліпшити необхідно було зменшити величину реактивної потужності контактної мережі.

На сучасному електрорухомому складі змінного струму вхідні перетворювачі здійснюють функції випрямлення і рекуперації. Складність вхідного перетворювача визначається вимогами забезпечення рівня електромагнітної сумісності з мережею живлення. При цьому необхідно забезпечити задані масо-габаритні показники і ККД.

Вхідні перетворювачі класифікуються таким чином [99]:

- випрямлячі з природною комутацією струму;
- випрямлячі з примусовою комутацією струму;
- випрямлячі з поетапною примусовою комутацією струму;
- імпульсні випрямлячі з регулюванням вихідної напруги (струму);
- чотириквADRANTНИЙ перетворювач.

Вихідні перетворювачі ЕРС здійснюють функції зміни параметрів електроенергії проміжної ланки і забезпечують регулювання рівня напруги в ланці постійного струму, що є актуальним як для асинхронного привода, так і

для привода постійного струму. При цьому залежно від прийнятої структури перетворення електроенергії і типу вхідного перетворювача [54, 173] вихідний перетворювач може здійснювати зміну або тільки частоти вихідного струму, автономний інвертор струму, або тільки частоти вихідної напруги, автономний інвертор напруги (АІН) з амплітудним регулюванням вихідної напруги, або частоти і рівня вихідної напруги, АІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) [19].

Найбільшого поширення на ЕРС змінного струму на українських залізницях загального користування набули випрямлячі із зонно-фазовим керуванням [108]. Вхідний перетворювач у цьому випадку являє собою випрямляч з природною комутацією струму з паралельним з'єднанням декількох плечей в одному мості перетворювача (рисунок 1.6).

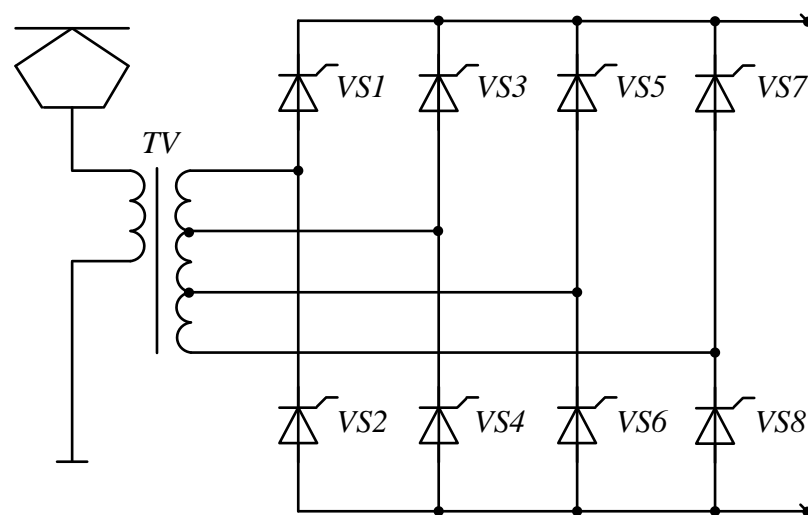


Рисунок 1.6 – Чотиризонний випрямляч електровоза ВЛ80^Р

У разі використання в тиристорному перетворювачі частоти АІН з амплітудним регулюванням вихідної напруги випрямляч може виконуватися з міжступеневим регулюванням напруги (ВЛ80^Р, ВЛ80^А, ЕР9^А) для збереження середньозваженого коефіцієнта потужності на рівні 0,8 у широкому діапазоні навантажень. Разом із тим у перетворювачі частоти такого електропривода втрати на комутацію струму в АІН з ШІМ прямо пропорційні кількості перемикань і мають більш високий рівень у порівнянні з АІН з амплітудним

регулюванням вихідної напруги. Використання зонно-фазових випрямлячів призводить до значного зменшення коефіцієнта потужності, зниження випрямленої напруги за рахунок індуктивних втрат і значного заважаючого впливу на лінії зв'язку і пристрої СЦБ. Для усунення зазначених недоліків вхідні перетворювачі оснащують пристроями примусової комутації тиристорів плечей одного з регульованих мостів.

Щодо закордонного досвіду, то перетворювач дослідного електровоза SV1 виробництва фірми «Stromberg» за участю фірми «Valmet» складається з випрямляча (рисунок 1.7), LC-фільтра і АІН з ШІМ.

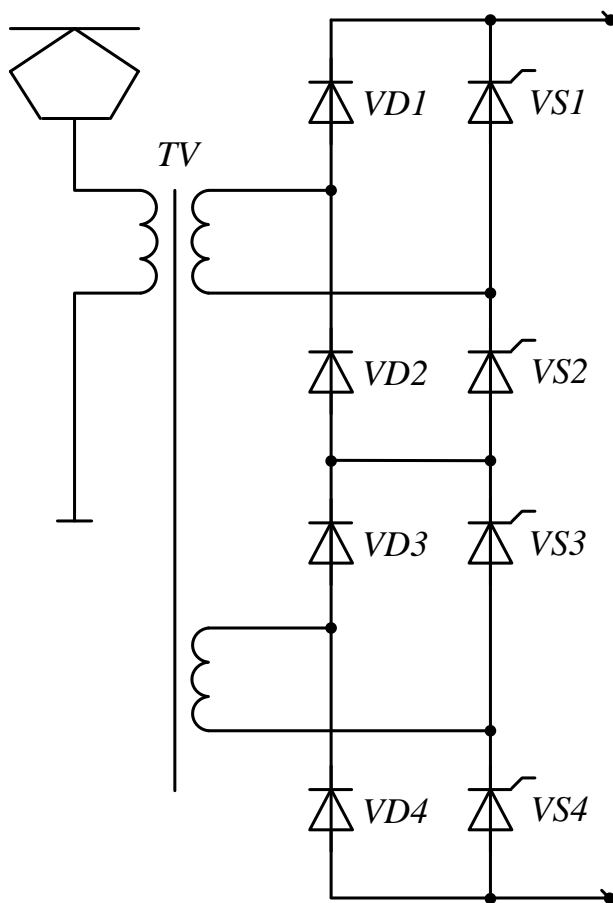


Рисунок 1.7 – Принципова схема вхідного випрямляча електровоза SV1 виробництва фірми «Stromberg»

Міст ($VD3$, $VD4$, $VS3$, $VS4$) включений у роботу постійно, напруга на конденсаторі фільтра підтримується постійно за рахунок фазового регулювання моста 2 ($VD1$, $VD2$, $VS1$, $VS2$). Перший міст випрямляча

електровоза SV1 можна було б виконати некерованим за аналогією до випрямляча електровоза Е-1200 фірми «BBC», але випрямляч, застосований фірмою «Stromberg», є кращим, оскільки в цьому випадку виключенням моста можна виключити підживлення від трансформатора при короткому замиканні в ланцюзі проміжної ланки або при перекиданні АІН [20].

Випрямляч із секторним регулюванням (рисунок 1.8) має вузол примусової комутації, що містить комутуючі тиристори VS5, VS7, конденсатори C1, C2, зарядні діоди VD6, VD5 і струмообмежувальний резистор R. При такій структурі перетворювача виникає можливість керування як моментом включення вентилів, так і моментом їх виключення, що дозволяє здійснювати зсув основної гармоніки струму мережі щодо напруги і регулювати величину коефіцієнта потужності на вхідних затискачах випрямляча.

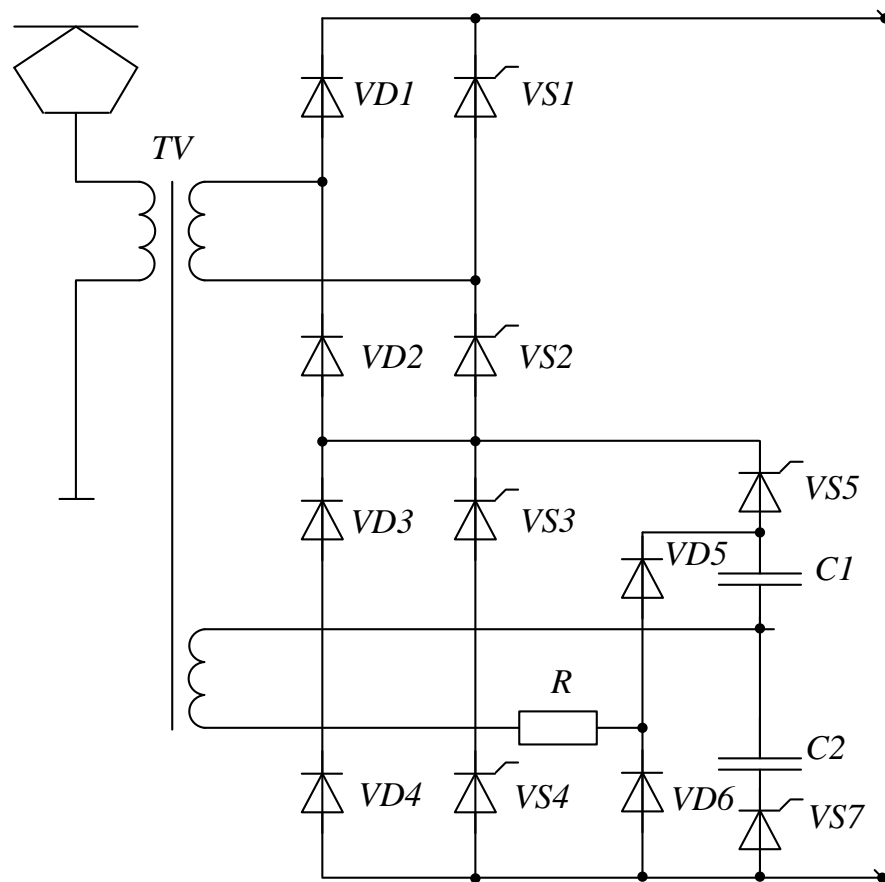


Рисунок 1.8 – Двоніжний випрямляч із секторним регулюванням та примусовою комутацією струму в першій зоні регулювання

У випрямлячі із секторним регулюванням включення вентилів *VS3*, *VS4* відбувається, як і у випрямлячі із зонно-фазовим регулюванням, а виключення здійснюється не під дією напруги мережі, а за допомогою попередньо заряджених конденсаторів, що дає змогу приблизно на 10 % підвищити коефіцієнт потужності в порівнянні з перетворювачем, який має керований випрямляч і АІН з амплітудним регулюванням. Дослідна експлуатація електропоїзда серії 420 (ФРН) довела переваги випрямлячів з примусовою комутацією.

При послідовному включенні випрямляча з природною комутацією і випрямляча з примусовою комутацією максимальний коефіцієнт потужності незалежно від співвідношення індуктивностей на стороні постійного струму і змінного струму становить $0,90 \div 0,93$ при двоконденсаторній примусовій комутації і $0,95 \div 0,96$ при триконденсаторному вузлі. Комбіновані діод-тиристорні випрямлячі з примусовою комутацією в однаковій мірі придатні для перетворювальних систем, побудованих за принципами перетворення напруги і перетворення струму. Для реалізації рекуперативного гальмування в перетворювачі діоди слід замінити тиристорами. Крім того, для реалізації більш високого коефіцієнта потужності в режимі рекуперативного гальмування необхідно модифікувати вузол примусової комутації [21].

З метою зниження згасаючих коливань струму, що виникають у моменти закінчення комутації і викликають спотворення форми кривої вхідного струму, застосовують випрямлячі з поетапною комутацією струму [60]. При цьому забезпечується наближення по фазі ступінчастої кривої струму при синусоїдальній напрузі. Поетапна комутація доцільна при наявності паралельних тиристорних плечей у перетворювачі. На рисунку 1.9 показана принципова схема такої випрямної установки, що складається з двох комбінованих мостових випрямлячів і двох насичувальних реакторів. Керування тиристорами обох мостів здійснюють із зсувом по фазі. Комутуючі пристрої, які не показані на схемі, можуть бути побудовані на основі схем з коливальним перезарядом конденсатора.

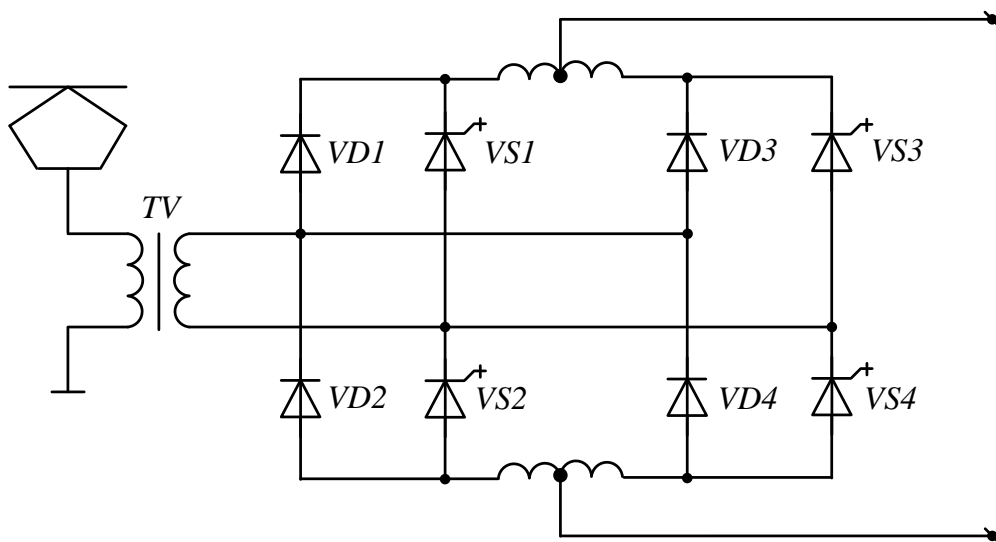


Рисунок 1.9 – Принципова схема силової схеми двозонного випрямляча з паралельним з'єднанням мостів

Оскільки виключення тиристорів проводиться із зсувом по фазі, виявляється можливим застосувати один загальний для всіх тиристорів комутуючий вузол (рисунок 1.10), на якому протягом позитивної напівхвилі напруги тиристири $VS1$ і $VS7$ виконують функції основних тиристорів випрямляча, а тиристири $VS2$ і $VS8$ разом із діодом $VD5$ утворюють буферний контур. Компенсуючий конденсатор $C1$ поглинає накопичену в індуктивностях енергію і забезпечує стабільний заряд комутуючого конденсатора $C2$.

Періодично в паузах між провідними станами основних тиристорів проводиться частковий розряд конденсатора $C1$ шляхом включення комутуючої тиристорної пари $VS4$, $VS5$ або $VS3$, $VS6$. При цьому розрядом комутуючого конденсатора здійснюється виключення комутуючих тиристорів, що перебували до цього в провідному стані. При униканні короткого замикання вторинної обмотки трансформатора в період комутації пристрій доповнюється двома буферними діодами $VD1$, $VD6$, а також діодами $VD3$, $VD4$. Протягом позитивної напівхвилі вхідної напруги в провідному стані перебуває діод $VD5$ і, отже, діоди $VD1$ і $VD6$ включені паралельно тиристорам $VS2$ і $VS8$, що створює буферний контур.

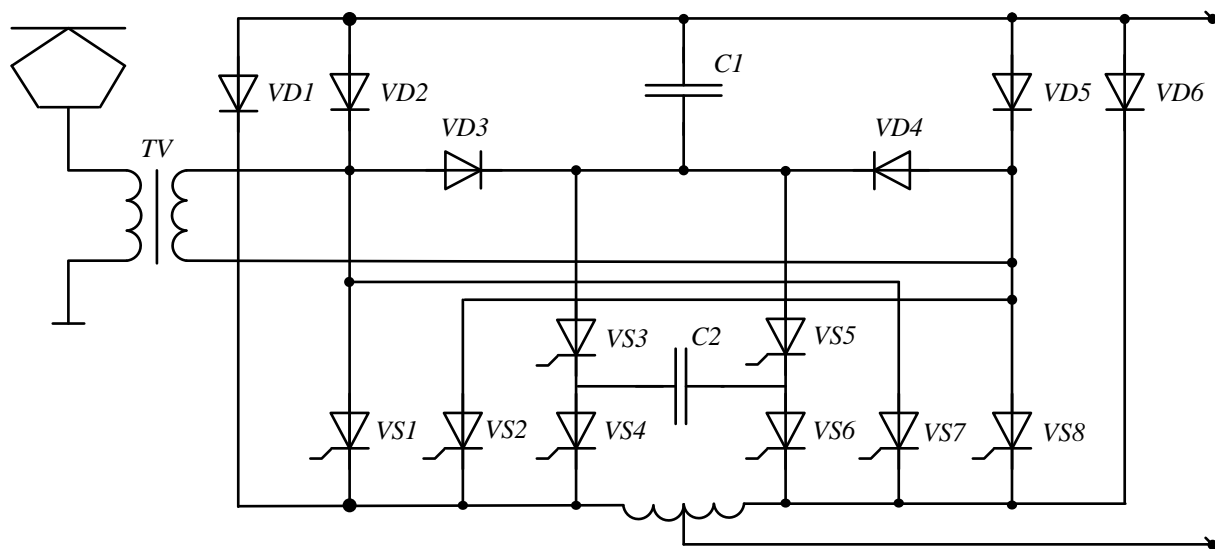


Рисунок 1.10 – Схема силових кіл вхідного чотиризонного перетворювача з поетапною комутацією вхідного струму

Середньозважений коефіцієнт потужності тиристорного мостового випрямляча з поетапною комутацією дорівнює коефіцієнту потужності випрямляча з двозонним регулюванням, у якого і на першій, і на другій зонах регулювання здійснюється примусова комутація плечей тиристорів і становить 0,83 [48].

Випрямно-інверторний перетворювач (ВІП) з регулюванням імпульсно-фазовим (РІФ), спрощена схема якого зображена на рисунку 1.11, також можна віднести до перетворювачів з поетапною комутацією [23, 24].

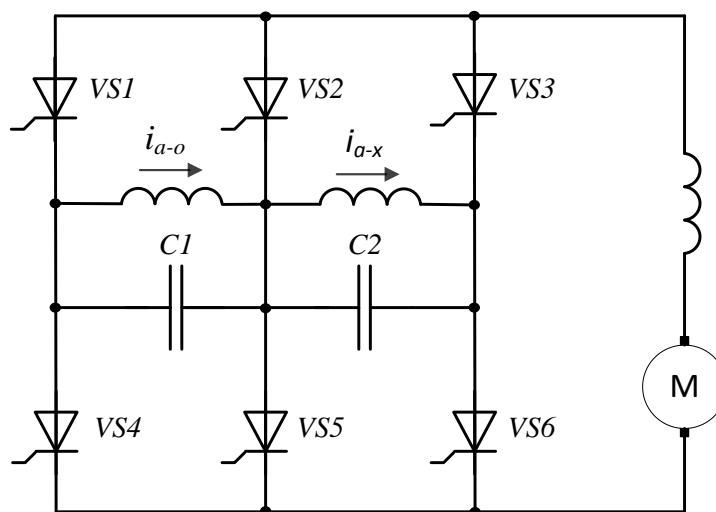


Рисунок 1.11 – Спрощена схема випрямно-інверторного перетворювача РІФ-4

Характерною особливістю перетворювача з РІФ є штучне формування фронтів кривої вхідного струму з використанням коливального процесу, що виникає під час комутації (тобто при введенні і виведенні струму навантаження в обмотках тягового трансформатора) в контурах, утворених вторинною напівобмоткою трансформатора і конденсаторами $C1$ та $C2$. Процеси комутації не супроводжуються коротким замиканням вторинної обмотки трансформатора, завдяки чому усуваються комутаційні втрати випрямленої напруги.

Плавність наростання і спаду напівхвилі вхідного струму обумовлює зниження заважаючого впливу на лінії зв'язку. При неповно випрямленій напрузі коефіцієнт потужності відповідає режиму однозонного фазового регулювання, однак, у режимі повного навантаження має значну перевагу, а саме виражає в інтегральній величині коефіцієнта потужності.

Існує принципова можливість підтримати підвищені значення коефіцієнта потужності також при неповній вихідній напрузі шляхом симетричного керування як моментом включення, так і моментом виключення силових тиристорів ще до середини півперіоду. Однак, наявність комутаційного викиду напруги, пов'язаного з примусовим включенням тиристорних плечей, потребує подвоєння числа послідовно з'єднаних тиристорів у всіх плечах перетворювача.

Подальше підвищення коефіцієнта потужності ЕРС змінного струму забезпечується комбінованим фазовим регулюванням у разі багатозонного перетворювача, що складається з керованих однофазних мостових тиристорних випрямлячів. Синусоїдальний змінний струм перетворюють у струм багатоступінчастої форми шляхом фазового регулювання з постійним зсувом кутів регулювання від зони до зони. При відповідному виборі кутів регулювання для кожної зони регулювання вищі гармоніки можна значно знизити [25].

Також при наявності декількох випрямлячів, які живляться від загального джерела (багатосекційні локомотиви та електропоїзди), можливе

застосування комбінованого способу регулювання напруги, яке полягає в тому, що при декількох ідентичних випрямлячах інтервали провідності їх тиристорів вибирають так, щоб ці інтервали не збігалися один з одним [48]. При цьому середньозважений коефіцієнт потужності збільшується і стає рівним 0,869 при комбінованому регулюванні трьох однозонних випрямлячів з примусовою комутацією [27].

Отже, розглянуті вище випрямлячі дають змогу реалізувати порівняно невисокий коефіцієнт потужності K_n на струмоприймачі ЕРС за рахунок кардинального підвищення коефіцієнта зсуву $\cos(\varphi)$ між основною гармонікою струму і напругою мережі живлення. Але навіть при $\cos(\varphi)$, що дорівнює одиниці, коефіцієнт потужності K_n може значно відрізнятись від одиниці у зв'язку з несинусоїдною формою кривої споживаного струму. Випрямні пристрої з поетапною комутацією дають змогу дещо поліпшити форму кривої вхідного струму, але форма вхідного струму залишається крокоподібною.

Принцип імпульсного регулювання тяговим випрямлячем (рисунок 1.12) полягає в тому, щоб за допомогою багаторазового включення і виключення тиристорного ключа в межах однієї напівхвилі напруги реалізувалося формування форми вхідного струму, наближеної до синусоїдального.

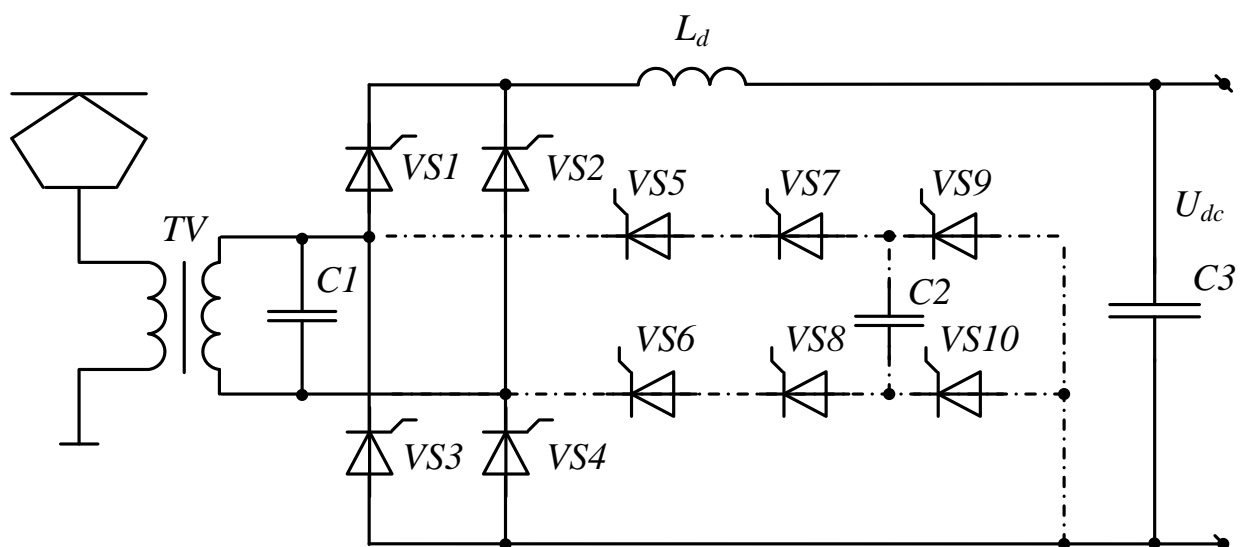


Рисунок 1.12 – Силова схема вхідного імпульсного випрямного перетворювача

Струм навантаження випрямляча складається з двох складових: струм вихідного конденсатора та струм, що протікає в колі згладжувального реактора L_d . Виключення основних тиристорів здійснюється в результаті перезаряду комутуючого конденсатора $C2$ після включення комутуючих тиристорів $VS5-VS10$. Коли конденсатор $C2$ перезарядиться настільки, що запасеної в ньому енергії виявиться досить для чергового процесу комутації, включенням комутуючих тиристорів утворюється буферний контур, в якому на деякий період часу замикається струм навантаження. Випрямляч при цьому закритий, вхідний конденсатор заряджається від мережі через вхідний дросель L_d струмом, величина якого поступово знижується у зв'язку з підвищенням напруги конденсатора, що заряджається. Коефіцієнт потужності такого імпульсного випрямляча в широкому діапазоні навантажень становить 0,98.

Випрямно-інверторний перетворювач імпульсного типу [18] (рисунок 1.13) містить чотири повністю керованих вентилях $VS1-VS4$ і два накопичувальних конденсатори $C1, C2$, відокремлені від мережі живлення діодами $VD1-VD4$.

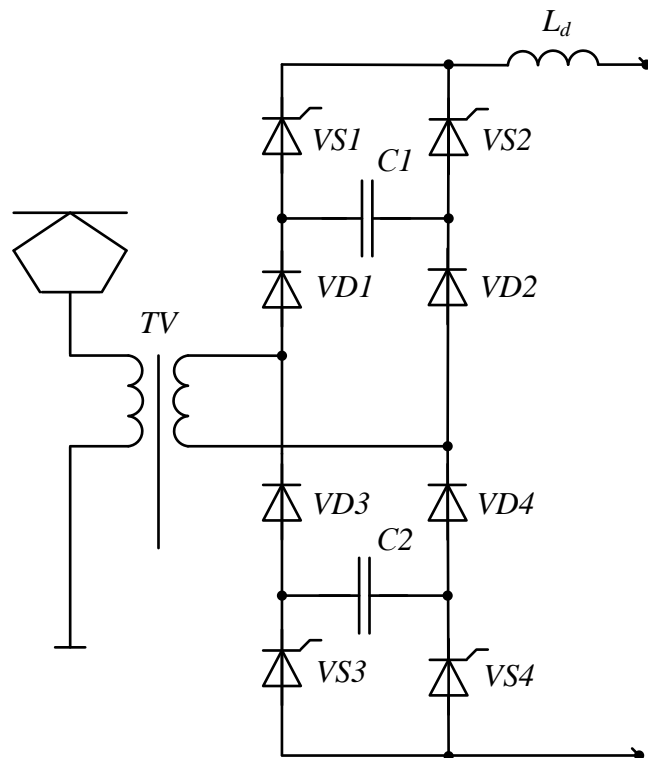


Рисунок 1.13 – Спрощена схема силових кіл імпульсного ВІП

До виходу перетворювача з боку навантаження підключений згладжувальний реактор L_d . Регулювання вихідної напруги здійснюється шляхом включення і виключення вентилів $VS1-VS4$ таким чином, щоб напруга на накопичувальних конденсаторах була синусоїдальної форми, а струм, що споживається при цьому з мережі, збігався за фазою з напругою мережі і мав би таку саму синусоїдальну форму. ВПІ дає змогу здійснювати роботу як з нульовим фазовим зсувом між струмом і напругою в контактній мережі, так і з випереджаючим в режимі тяги і рекуперативного гальмування.

Результати експлуатаційних випробувань електропоїзда типу ET420 (ФРН) показали, що використання випрямлячів з примусовою комутацією струму хоча і не дає економії у вартості, габаритах і масі електрообладнання ЕРС, але істотно підвищує коефіцієнт потужності і дає змогу знизити масу компенсуючих конденсаторів на тягових підстанціях [16].

Це обумовлено наявністю головної переваги імпульсних випрямлячів – можливістю підвищення коефіцієнта потужності до величини, близької до одиниці. При цьому підвищення коефіцієнта потужності від 0,8 до 1,0 при передачі одної і такої ж активної енергії викликає суттєве зниження активних втрат і знижує загальне навантаження системи енергопостачання [3, 34].

Одним з типів імпульсних випрямлячів, який забезпечує стабілізацію вихідної напруги, є двоквADRANTНИЙ перетворювач (рисунок 1.14), який містить чотири діоди $VD1-VD4$, два головних $VS1, VS2$ і два комутуючих $VS3, VS4$ тиристорів, які спільно з комутуючим конденсатором C і дроселем L забезпечують включення тиристорів $VS1, VS2$. При провідному тиристорі $VS2$ струм, що споживається з контактної мережі, протікає через вхідний трансформатор і зростає зі швидкістю, яка визначається величиною індуктивності трансформатора і напругою мережі. На виході перетворювача напруга дорівнює напрузі на конденсаторі C_ϕ і зменшується.

Якщо тиристор $VS2$ закривається, то енергія, запасена в обмотці трансформатора, передається через діод $VD2$ в конденсатор C_ϕ , що викликає підвищення напруги на ньому.

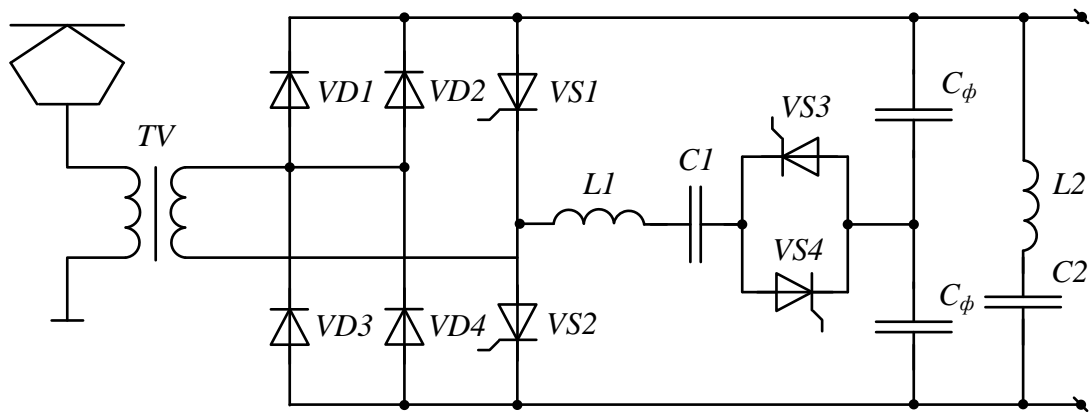


Рисунок 1.14 – Схеми силових кіл двоквADRантного перетворювача

Регулюючи тривалість включеного і виключеного стану тиристора $VS2$, можна змінювати величину напруги на конденсаторах C_ϕ , причому напруга на виході перетворювача буде більшою, ніж на вході. На виході перетворювача включений резонансний фільтр $L2C2$, налаштований на другу гармоніку струму, а також фільтр для згладжування вищих гармонік, виконаний у вигляді двох послідовно з'єднаних конденсаторів C_ϕ . Двоквадрантний вхідний перетворювач, виконаний з використанням діодів $VD1-VD4$, забезпечує роботу дволанкового перетворювача тільки в тяговому режимі. Значним недоліком двоквадрантного випрямляча є відсутність можливості реалізації процесу рекуперації енергії в контактну мережу, що значно знижує енергетичну ефективність цього перетворювача.

Найбільш перспективною топологією вхідного випрямляча на ЕРС змінного струму є активний чотириквADRантний випрямляч у режимі корекції коефіцієнта потужності, відомий як 4QS-перетворювач, схема якого наведена на рисунку 1.15. До складу даного 4QS-перетворювача входять чотири повністю керованих силових транзистори $VT1-VT4$, вхідний дросель $L1$, вихідний згладжувальний конденсатор $C1$ та резонансний фільтр $L2C2$, налаштований на частоту другої гармоніки 100 Гц. Навантаженням 4QS-перетворювача є автономний інвертор напруги. Наявність у перетворювачі повністю керованих ключів дає змогу досягати максимального ефекту в керуванні випрямлячем. Такі ключі можуть бути реалізовані на IGBT,

MOSFET або GTO приладах. Це дає змогу виконувати комутацію ключів з частотою декілька кілогерців.

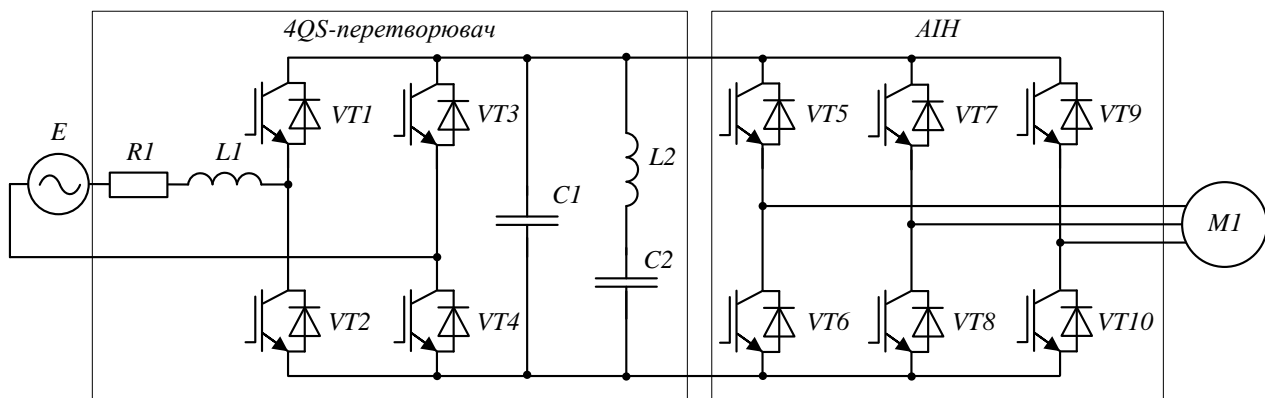


Рисунок 1.15 – Структура тягового електропривода ЕРС з вхідним 4QS-перетворювачем

Основними перевагами активного вхідного 4QS-перетворювача є низький вміст вищих гармонік вхідного струму, близький до одиниці $\cos\varphi$, реалізація двонапрявленої передачі енергії, регулювання значення коефіцієнта потужності, можливість регулювання і стабілізації вихідної напруги.

На рисунку 1.16 наведені осцилограми напруг і струмів вхідного 4QS-перетворювача в таких режимах роботи: випрямлення (режим тяги ЕРС), рекуперація, реалізація випереджаючого і відстаючого струму мережі.

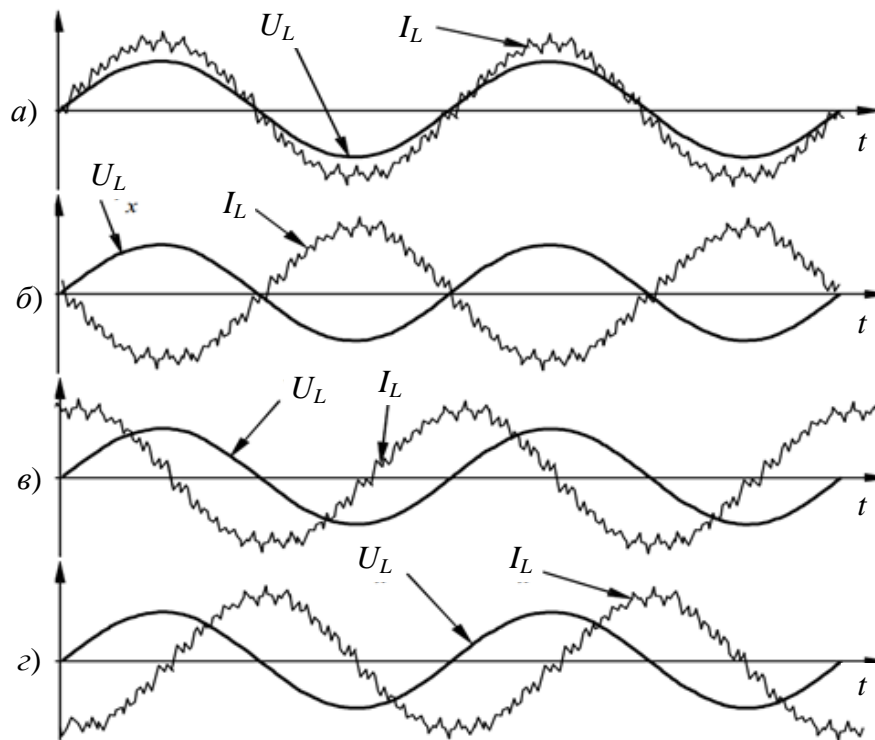


Рисунок 1.16 – Форма напруг і струмів 4QS-перетворювача в таких режимах роботи: *a* – випрямний режим $\lambda \approx 1$; *b* – режим рекуперації $\lambda \approx -1$; *в* – режим відстаючого струму мережі $\lambda \approx 0$; *г* – режим випереджаючого струму мережі $\lambda \approx 0$

1.4. Висновки до першого розділу

У розділі показано, що в цілому використання рекуперативного гальмування на залізницях України має досить низький рівень. Основними причинами цього є те, що значна частина електрорухомого складу не оснащена системами рекуперативного гальмування, а існуючі системи рекуперативного гальмування мають значні недоліки. Системи автоматичного регулювання (САР) струму якоря в режимі рекуперативного гальмування на ЕРС постійного струму є не оптимізованими, що в ряді випадків призводить до значних затримок відпрацювання сигналів завдання, що призводить до нестабільності САР та її виходу з ладу. Поставлено задачу оптимізації швидкодії двоконтурної системи автоматичного регулювання струму збудження та струму якоря тягових двигунів постійного струму, з реалізацією мінімального

часу перехідного процесу за рахунок синтезу регуляторів, які задовольняють умови кінцевої тривалості САР.

Щодо ЕРС змінного струму, то вхідні тиристорні випрямлячі, які забезпечують процеси випрямлення та рекуперації енергії до контактної мережі, зумовлюють ряд значних недоліків. Серед таких недоліків слід зазначити відносно низький коефіцієнт потужності та значні спотворення форми спожитого струму, що зумовлює значну емісію вищих гармонік у контактну мережу.

На основі виконаного аналізу зроблено висновок, що перспективним є впровадження вхідних чотириквadrантних перетворювачів, які дають змогу реалізувати коефіцієнт потужності, близький до одиниці ($> 0,99$), форму вхідного струму з коефіцієнтом гармонічних спотворень менше 5 %, стабілізацію і регулювання напруги в ланці постійного струму та можливість реалізації процесу рекуперації. Проте недоліком активного чотириквadrантного перетворювача є необхідність реалізації досить високої частоти комутації силових ключів, які у свою чергу мають досить обмежені частотні властивості. Таким чином, у роботі поставлено завдання розроблення і дослідження систем керування вхідним активним чотириквadrантним перетворювачем з корекцією коефіцієнта потужності.