

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської роботи

зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

На тему: «Підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту в
умовах залізничної шахти»

КНУ.МР.141.25.665с-03

Виконав студент_II_ курсу , групи ЕПА-24м _____/Горбенко С.В./

Керівник:

д.е.н., професор _____/Берідзе Т.М./

Нормоконтролер:

д.е.н., професор _____/Берідзе Т.М./

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор _____/Сінчук О.М./

Гарант ОПП,

к.т.н., доцент _____/Осадчук Ю.Г./

Кривий Ріг

2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ГОРБЕНКО Станіслав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту
в умовах залізничної шахти

1. Термін подання студентом роботи: 10 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту на базі електровозу К10. Завданням є дослідження і розробка методів для підвищення ефективності роботи рейкового транспорту.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):
I. Аналіз ефективності шахтного електровоза К10 та шляхи її підвищення;
II. Розробка системи імпульсного керування тяговим приводом з накопичувачем енергії; III. Дослідження ефективності електроприводів методами імітаційного моделювання.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): I. Загальна характеристика та аналіз енергоефективності електровоза К10; II. Функціональна схема модернізованого тягового електроприводу з рекуперацією енергії; III. Структурна схема системи автоматичного керування електроприводом; IV. Алгоритм керування потоками потужності та зарядом накопичувача; V. Імітаційні моделі електроприводів в середовищі MATLAB/Simulink; VI. Результати моделювання системи з РКСК та імпульсної системи з бортовим накопичувачем; VII. Циклограма руху електровоза та діаграми розподілу енергетичних потоків.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Технічна характеристика та умови експлуатації шахтного електровоза К10	10.09.25
2	Аналіз недоліків існуючої реостатно-контакторної системи керування	12.09.25
3	Визначення методів та шляхів підвищення ефективності шахтного електровоза К10	17.09.25
4	Розробка функціональної схеми електроприводу електровоза К10	10.10.25
5	Вибір бортового накопичувача енергії та розрахунок його параметрів	15.10.25
6	Розробка системи керування електроприводом електровоза	30.10.25
7	Розробка та дослідження моделі існуючої системи керування електроприводом електровоза К10	10.11.25
8	Розробка та дослідження запропонованої системи електроприводу електровоза	24.11.25
9	Порівняльний аналіз ефективності існуючої системи керування та запропонованої системи	01.11.25
10	Розрахунок економічної ефективності впровадження системи	05.12.25

Дата видання завдання 15.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Станіслав ГОРБЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему: «Підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту в умовах залізничної шахти»; КНУ.МР.141.25.665с-03

Мета дослідження - Підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту на базі електровозу К10.

Об'єкт дослідження – електропривод електровоза К10.

В першому розділі проаналізовано існуючу систему керування тяговим електроприводом шахтного електровоза К10 та можливості впровадження сучасних технологій для підвищення його ефективності та надійності.

У другому розділі була розроблена система керування на основі імпульсного перетворювача з бортовим накопичувачем енергії.

У третьому розділі виконано дослідження ефективності електроприводів методами імітаційного моделювання.

ШАХТНИЙ ЕЛЕКТРОВАЗ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ІМПУЛЬСНЕ КЕРУВАННЯ, РЕКУПЕРАЦІЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА К10 ТА ШЛЯХИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ	9
1.1. Технічна характеристика та умови експлуатації шахтного електровоза К10	9
1.2. Аналіз недоліків існуючої реостатно-контакторної системи керування	12
1.3. Шахтна система електропостачання	14
1.4. Методи та шляхи підвищення ефективності шахтного електровоза	15
1.5. Висновок до розділу 1	18
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ	19
2.1. Розробка функціональної схеми електроприводу електровоза К10	19
2.2. Вибір бортового накопичувача енергії та розрахунок його параметрів	25
2.3. Синтез системи автоматичного керування електроприводом	29
2.4. Розробка алгоритму керування накопичувачем енергії на базі суперконденсатора	31
2.6. Висновки до розділу 2.	33
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕТОДАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	34
3.1. Розробка та дослідження моделі існуючої системи керування електроприводом електровоза К10	34
3.2. Розробка та дослідження запропонованої системи електроприводу електровоза	37
3.3. Порівняльний аналіз ефективності існуючої системи керування та запропонованої системи	44
3.4. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи	47

Висновок	50
Список використаної літератури	52

ВСТУП

Гірничодобувна промисловість залишається однією з ключових галузей економіки України, забезпечуючи енергетичну безпеку та сировинну базу для металургії. Ефективність роботи гірничих підприємств значною мірою залежить від надійності та економічності внутрішньошахтного транспорту, особливу роль відіграють електровози. Основу парку локомотивів на горизонтальних виробках становлять контактні електровози серії К (зокрема К10 та К14), які незважаючи на надійну механічну частину, оснащені морально застарілою реостатно-контакторною системою керування (РКСК).

В умовах різкого зростання вартості електроенергії питання енергоефективності набуває великої актуальності. Експлуатація електровозів з РКСК супроводжується значними непродуктивними втратами. Принцип реостатного регулювання передбачає гасіння надлишкової напруги мережі на пускових резисторах, де енергія перетворюється на тепло. Робота шахтного транспорту пов'язана з маневруванням, частими зупинками і постійними та рух на малих швидкостях під час завантаження. У таких режимах ККД електроприводу падає до критичних значень (30-90%).

Шахтні підземні мережі мають свою особливість, а саме: велику протяжність ліній при обмеженому перерізі контактного проводу та змінному опорі рейок, що формує мережу з високим внутрішнім опором чутливу до перевантажень. Прямий пуск двигунів послідовного збудження, що супроводжується кидками струму в 1,5-2 рази вище номінального, що іноді, у найвіддаленіших частинах мережі викликає глибокі просадки напруги (до 30 - 40% від $U_{ном}$). Такі коливання дестабілізують роботу іншого електрообладнання, знижують швидкість руху інших електровозів та збільшують ймовірність аварійних відключень підстанцій.

Суттєвим недоліком існуючої системи електроприводу є відсутність ефективного електричного гальмування. Гальмування здійснюється або протиструмом (що є аварійним режимом і викликає величезні перевантаження), або механічними пневмо-колодковими гальмами. Інтенсивне використання

механічних гальм призводить до швидкого зносу колодок та бандажів коліс, а також створює ризик перегріву гальмівних вузлів. Крім того, комутаційна апаратура (контролери, реверсори) працює в умовах розриву струмів значної величини, що супроводжується дугоутворенням, електророзією контактів та зниженням пожежної безпеки.

Повна заміна шахтних електровозів на сучасні аналоги потребує колосальних вкладень, що часто є непосильним для підприємств. Економічно доцільним шляхом є глибока модернізація існуючого рухомого складу. Впровадження напівпровідникових перетворювачів дозволяє перейти до безступінчастого регулювання, а застосування бортових накопичувачів енергії (суперконденсаторів) відкриває можливості рекуперації, згладжування пікових навантажень, що розвантажує мережу та забезпечення короткочасного руху на знеструмлених ділянках або при обриві контактного проводу.

Таким чином, розробка системи керування тяговим електроприводом з гібридним джерелом енергії є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить подовжити термін служби парку електровозів К10, зменшити собівартість транспортування руди, а також підвищити надійність електропостачання підземних виробок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА K10 ТА ШЛЯХИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

1.1. Технічна характеристика та умови експлуатації шахтного електровоза K10

Шахтний контактний електровоз K10 є основним видом тягового рухомого складу, що використовується для транспортування вантажів (гірничої маси, обладнання, матеріалів) та перевезення людей по магістральних горизонтальних виробках шахт і рудників.

Електровоз K10 являє собою локомотив з двома осями та приводом на кожну вісь. Основу механічної частини складає жорстка рама, яка спирається на букси колісних пар через пружинну підвіску. Така конструкція дозволяє зменшити динамічні навантаження на тягові двигуни та верхню будову колії під час руху по нерівностях рейкового шляху.

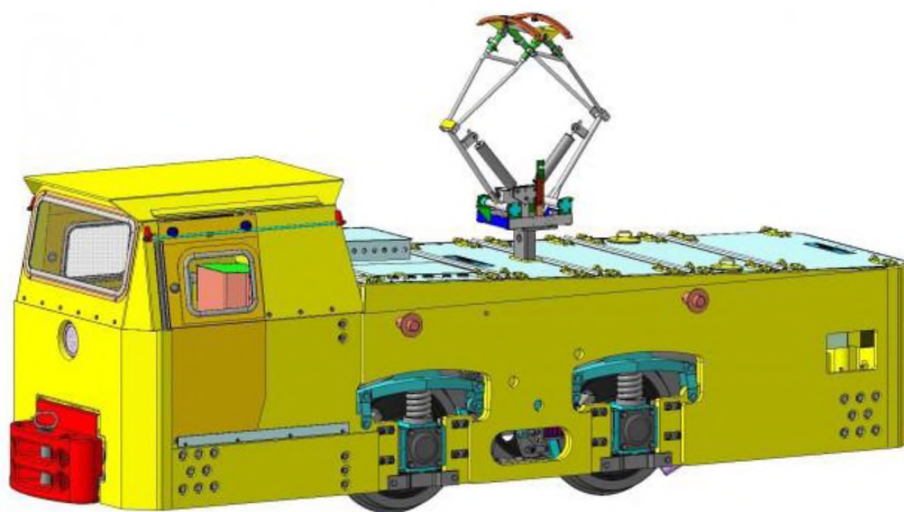


Рисунок 1.1 - Електровоз K10

Основні технічні характеристики

На електровозі встановлено два тягові електродвигуни постійного струму типу ДТН-33/20. Двигуни мають послідовне збудження, що є традиційним рішенням для рудничних тягових електровозів. Вибір саме такої системи збудження обумовлений тим, що при зростанні навантаження швидкість двигуна автоматично знижується, а обертальний момент зростає, що запобігає

перевантаженню мережі за потужністю (рис.2). Також робота двигунів залишається стійкою навіть при значних коливаннях напруги в контактній мережі, оскільки при зниженні напруги змінюється лише швидкість, а сила тяги майже не падає.

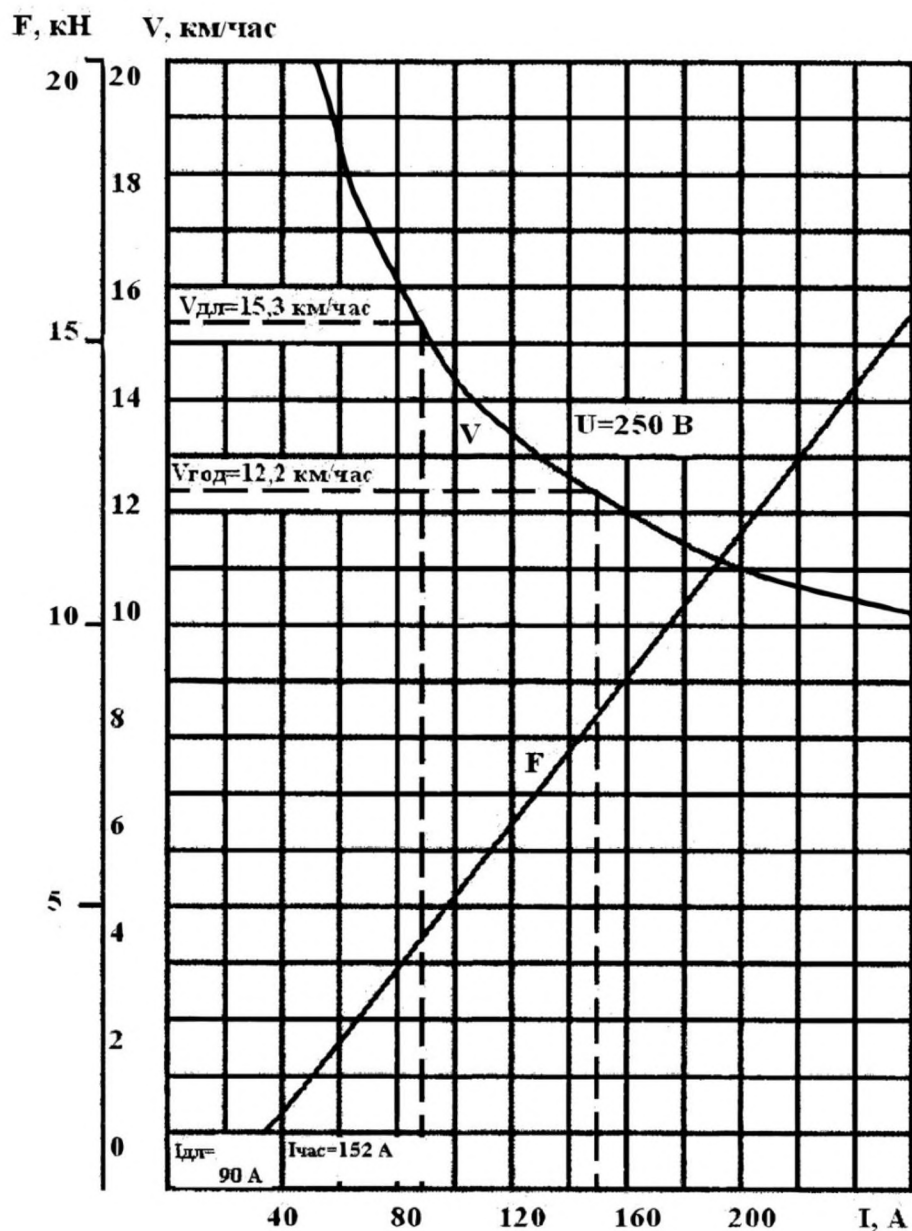


Рисунок 1.2 - Електромеханічна характеристика ДТН-33/20 [1]

Живлення електровоза здійснюється від мережі постійного струму напругою 250 В.

Для ТЕД реостатно-контакторна система (РКС) є базовою системою керування. Водій керує тягою та швидкістю за допомогою багатопозиційного контролера (наприклад КС-303), який комутує групи пускових реостатів та

змінює схему з'єднання двигунів (послідовне "С" та паралельне "П" з'єднання) для ступінчастого регулювання напруги та струму.

Передача крутного моменту від валу двигуна до колісної пари здійснюється через одноступінчастий циліндричний редуктор. Основні технічні параметри електровоза зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики електровоза К10

Найменування параметра	Позначення	Значення
Зчіпна маса	P_c	10 т
Напруга контактної мережі	U	250 В
Тягові двигуни (2 шт.)		
Тип	-	ДТН-33/20
Потужність (годинний режим)	$P_{год}$	33 кВт
Годинний режим		
Сила тяги електровоза	$F_{год}$	19 кН
Швидкість руху	$v_{год}$	12,3 км/год
Струм двигуна	$I_{год}$	152 А
Тривалий режим		
Сила тяги електровоза	$F_{тр}$	19 кН
Швидкість руху	$v_{тр}$	15,3 км/год
Струм двигуна	$I_{тр}$	92 А
Параметри схеми		
Опір якоря (при 20°C)	R_a	0,125 Ом
Передаточне число редуктора	μ	10,97
Діаметр колеса	D_k	0,68 м

Ці характеристики визначають базові тягові та енергетичні можливості електровоза.

Експлуатація електровоза К10 відбувається у складних гірничо-геологічних умовах. Шахтне середовище характеризується високою вологістю, наявністю струмопровідного пилу та хімічно агресивних вод, що висуває підвищені вимоги до ізоляції та захисту електрообладнання.

Електропостачання здійснюється від тягових підстанцій, які перетворюють змінний струм промислової частоти у постійний за допомогою випрямлячів. Особливістю шахтних мереж є їх значна протяжність та відносно високий внутрішній опір. Це призводить до того, що при пуску електровоза, коли споживаний струм значно перевищує номінальний, виникають суттєві падіння напруги на струмоприймачі.

Отже, технічні характеристики електровоза К10 дозволяють виконувати необхідні транспортні задачі, проте жорсткі умови експлуатації, протяжна шахтна мережа живлення та фізичні обмеження вимагають вдосконалення системи керування для підвищення ефективності та надійності роботи.

1.2. Аналіз недоліків існуючої реостатно-контакторної системи керування

Керування швидкістю руху та обертальним моментом тягових двигунів електровоза К10 у базовій комплектації здійснюється за допомогою реостатно-контакторної системи керування (РКСУ). Принцип її дії полягає у дискретній зміні напруги на затискачах двигунів двома методами: перемиканням схеми з'єднання двигунів (з послідовного на паралельне) та введенням у коло якоря секцій пусково-гальмівних резисторів.

Незважаючи на відносну простоту конструкції, дана система має ряд принципових недоліків, які суттєво знижують ефективність експлуатації електровоза.

Найбільшим недоліком РКСК є великі втрати електроенергії під час пускових режимів. Під час пуску та регулювання швидкості значна частина потужності, що споживається з контактної мережі, розсіюється у вигляді тепла на пускових резисторах.

Згідно з даними експлуатаційних досліджень, втрати енергії в резисторах складають у середньому 30% від загального споживання електроенергії за рейс. Однак, специфіка роботи шахтного електровоза передбачає значну частку маневрових операцій (підтягування вагонів під завантаження, формування составу), які виконуються на низьких швидкостях з включеними резисторами.

У таких режимах втрати енергії можуть досягати 90%, що робить ККД електроприводу дуже низьким. [1]

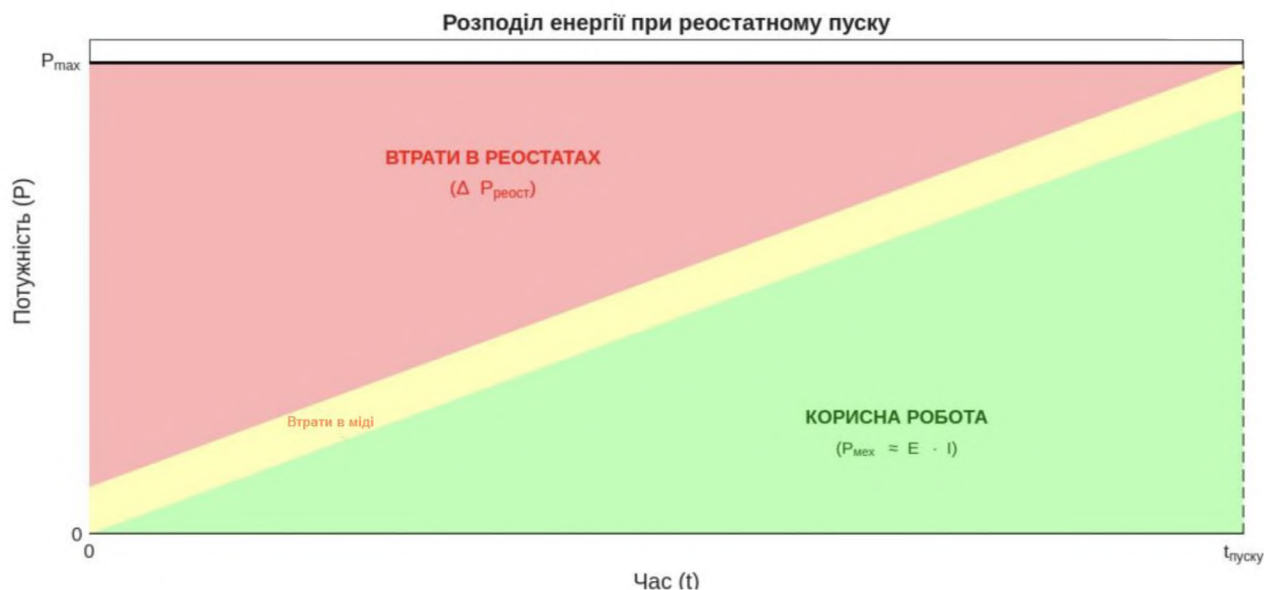


Рисунок 1.3 – Енергетична діаграма втрат при реостатному пуску

Зміна опору в колі якоря відбувається ступінчато при перемиканні позицій контролера, що викликає різкі кидки струму та стрибкоподібну зміну сили тяги. Така нерівномірність моменту призводить до зниження реалізованої сили тяги, оскільки пікові значення моменту часто перевищують межу зчеплення коліс з рейками, що провокує зрив у буксування. Це обмежує масу поїзда, яку може зрушити електровоз, особливо на забруднених рейках. Такі ударні навантаження на зубчасті передачі редуктора та колісні пари призводять до їх передчасного руйнування.

Також штатна система передбачає режим реостатного гальмування, при якому двигуни самозбуджується і переходить в генераторний режим, а вироблена енергія гаситься на резисторах. Основним недоліком цього режиму є відсутність рекуперації, кінетична енергія поїзда повністю втрачається, перетворюючись на тепло, замість того, щоб повертатися в мережу або накопичувач.

Прямий пуск або пуск з малим опором резисторів супроводжується споживанням струмів, що значно перевищують номінальні. В умовах протяжних шахтних мереж з високим внутрішнім опором це викликає значні

падіння напруги. Глибокі просадки напруги можуть призводити до відключення підстанцій захистом та порушувати роботу іншого електрообладнання на дільниці.

РКСУ є жорсткою системою, яка погано піддається автоматизації. Вона ускладнює впровадження сучасних алгоритмів керування, таких як захист від буксування, дистанційне керування або оптимізація енергоспоживання.

1.3. Шахтна система електропостачання

Шахтна підземна система електропостачання має певні особливості, які сильно відрізняють її від надземних систем. Живлення контактної мережі здійснюється від тягових перетворювальних підстанцій (ТПП), які розміщуються в спеціальних камерах біля стволів або в глибині шахтного поля. Тягові підстанцій перетворюють змінний струм напругою 6 кВ у постійний струм напругою 275 В на шинах підстанції. [2]

Однак шахтні тягові мережі мають значну протяжність при відносно невеликому перерізі контактного проводу. Крім того, функцію зворотного проводу виконують рейкові шляхи. В умовах агресивного шахтного середовища (волога, кислотність вод) перехідний опір у рейкових стиках є нестабільним і часто завищеним.

Внаслідок цього повний опір кола «підстанція - електровоз» досягає значних величин. Згідно із законом Ома, падіння напруги в лінії прямо пропорційне струму навантаження.

При використанні реостатної системи керування пуск електровоза супроводжується споживанням струму, що у 1,5–2 рази перевищує номінальний. Це викликає глибокі просадки напруги на струмоприймачі (до 180–200 В і нижче).

Негативними наслідками провалів напруги є зниження продуктивності, оскільки швидкість руху електровоза пропорційна напрузі на якорі, то при просадках напруги електровоз втрачає швидкість, що збільшує час рейсу.

Також коливання напруги порушують роботу систем автоматики, сигналізації та освітлення, які часто живляться від тієї ж контактної мережі.

Більшість тягових підстанцій у шахтах оснащені некерованими діодними випрямлячами. Такі випрямлячі мають односторонню провідність, вони можуть передавати енергію від енергосистеми в шахту, але фізично не здатні інвертувати енергію у зворотному напрямку, таким чином рекуперація енергії в мережу змінного струму неможлива.

При спробі рекуперативного гальмування без накопичувача виникає проблема, а саме, якщо електровоз генерує струм у мережу і на цій ділянці немає іншого споживача, наприклад, іншого електровоза, енергії не може споживатися.

Це ключовий фактор, що обґрунтовує в разі впровадження рекупераційного гальмування необхідність встановлення накопичувача.

1.4. Методи та шляхи підвищення ефективності шахтного електровоза

Аналіз умов експлуатації та енергетичних показників електровоза K10 свідчить про необхідність комплексної модернізації. Основними напрямками підвищення ефективності підземного рейкового транспорту є: модернізація системи керування, заміна типу тягового приводу, гібридизація джерела живлення та забезпечення автономності.

Розглянемо кожен із цих методів детальніше:

1) Заміна реостатно-контакторної системи керування (РКСК) на імпульсний перетворювач.

Традиційна РКСК, що використовується на базових моделях K10, характеризується значними втратами енергії в пускових реостатах, східчає регулювання сили тяги, що призводить до пробуксовок, та низька надійність контакторів.

Альтернативою є впровадження імпульсного регулювання на базі DC/DC перетворювачів (чоперів) з використанням силових транзисторів IGBT.

Основними перевагами методу є плавний безреостатний пуск - енергія не розсіюється у вигляді тепла, а регулюється методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що підвищує ККД електроприводу і підвищує плавність ходу

також він дозволяє реалізувати максимальну силу тяги на межі зчеплення коліс з рейками, зменшуючи знос бандажів та механічних передач. Також сучасні мостові схеми дозволяють легко реалізувати безконтакторний реверс та режим рекуперативного гальмування.

2) Заміна тягового двигуна постійного струму на асинхронний привід.

Цей метод модернізації є більш радикальним, оскільки передбачає відмова від колекторних двигунів постійного струму на користь асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, що живляться від частотно-регульованого перетворювача (інвертора).

Основними перевагами АД є вища надійність через відсутність щітково-колекторного вузла, який є найбільш вразливим елементом системи, кращі масогабаритні показники та вища перевантажувальна здатність.

Основним недоліком для модернізації електровоза цим методом є висока капітальна вартість, оскільки потребує заміни не тільки системи керування, але й самих тягових двигунів.

Враховуючи економічні фактори, для модернізації існуючого парку доцільніше залишити двигуни ДТН-33/20, але покращити керування ними за допомогою імпульсних перетворювачів.

3) Впровадження накопичувачів енергії.

Однією з ключових проблем контактних мереж шахт є значні "провали" напруги під час пуску важких поїздів та неможливість прийому енергії рекуперації тяговими підстанціями з діодними випрямлячами. Рішенням є встановлення на борту електровоза гібридного накопичувача енергії (найчастіше на базі суперконденсаторів або акумуляторів), що збільшить короткочасну потужність й прискорить час розгону електровоза.

Під час пуску енергія береться не тільки з контактної мережі, але й з бортового накопичувача, що знижує навантаження на мережу та зменшує падіння напруги.

Також під час гальмування енергія не розсіюється на гальмівних резисторах, а заряджає бортовий накопичувач.

Таким чином цей метод дозволить знизити пікове споживання струму з мережі і реально використати потенціал рекуперативного гальмування без модернізації тягових підстанцій.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано аналіз тягового електроприводу шахтного електровоза К10 та системи його електропостачання. Результати аналізу показують низьку енергоефективність базової РКСК. Втрати енергії в пускових резисторах складають в середньому 30% від загального споживання, а в режимах маневрової роботи та руху на малих швидкостях, характерних для технологічного циклу шахти, сягають 90%.

Пуски двигунів послідовного збудження створюють значні пікові навантаження (в 1,5–2 рази вищі за номінальні), що в умовах протяжних шахтних мереж зі значним внутрішнім опором призводить до глибоких провалів напруги, що дестабілізує роботу електрообладнання.

Також визначено що повноцінне використання рекуперативного гальмування в існуючій системі електропостачання неможливе і потребує впровадження накопичувачів енергії.

Розглянуто сучасні методи для підвищення ефективності експлуатації рейкового транспорту. Визначено що найбільш економічно обґрунтованим та технічно ефективним варіантом модернізації електровоза К10 є комбінований підхід, а саме збереження існуючих ДПС послідовного збудження електровозів із заміною РКСК на імпульсний перетворювач та встановлення бортового накопичувача для реалізації рекуперації, збільшення короткочасної потужності.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1. Розробка функціональної схеми електроприводу електровоза К10

Основою підвищення ефективності функціонування шахтного електровоза К10 є заміна існуючої реостатно-контакторної системи керування (РКСК) на сучасну систему імпульсного керування з можливістю рекуперації енергії. Головним технічним викликом при цьому є забезпечення реверсування тягового двигуна послідовного збудження та його переведення в режим рекуперативного гальмування.

Для вирішення поставлених задач розроблено функціональну схему силового блоку, представлену на рис. 2.1.

Для спрощення на схемі показано не показано тяговий перетворювач другого двигуна електровоза, який має таку саму схему. Застосування індувальних імпульсних перетворювачів на кожен двигун дає можливість регулювати тягові і тормозні зусилля цих двигунів незалежно, що дає змогу впровадження керування на межі зчеплення електровоза з рейками, а також це підвищує надійності роботи електровоза, оскільки у разі несправності одного із тягових перетворювачів електровоз зможе працювати на іншому.

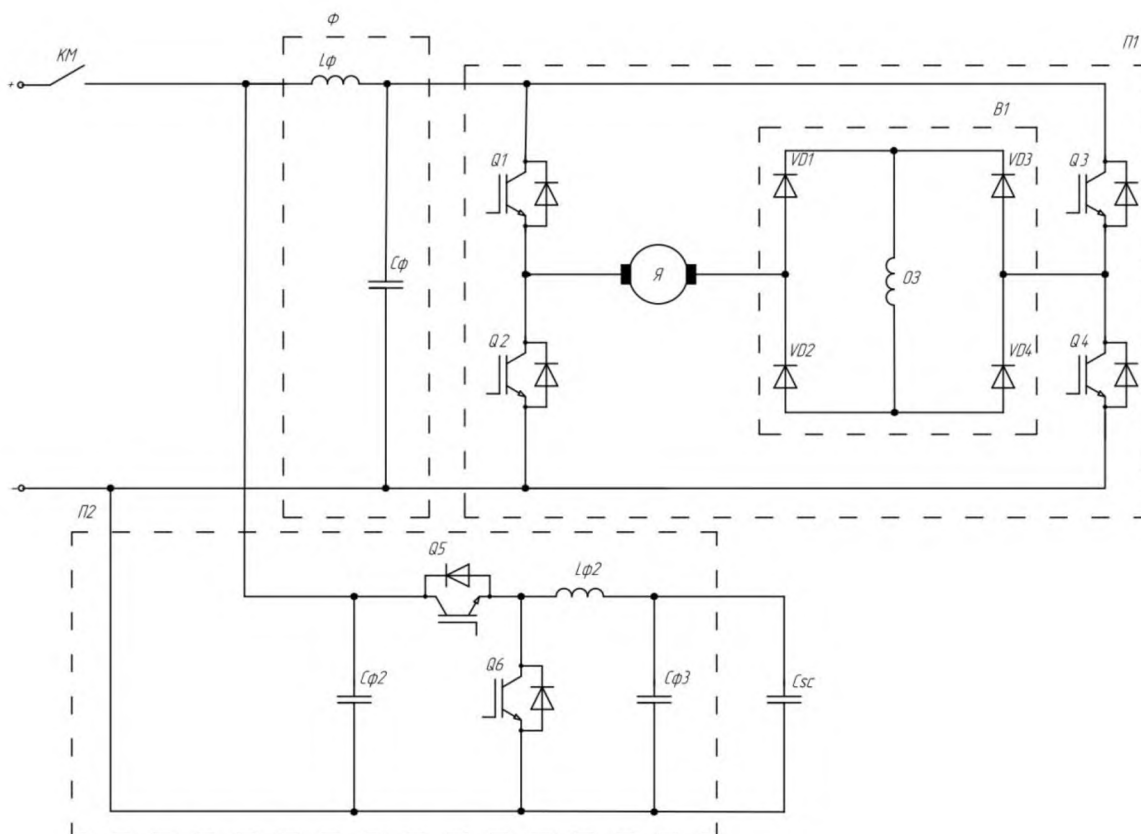


Рисунок 2.1 - Функціональна схема електропривода електровоза: П1 - Тяговий 4 квадрантний DC-DC перетворювач; П2 - двонапрямлений DC-DC перетворювач накопичувача енергії; В1 - діодний міст обмотки збудження; Ф - вхідний фільтр

Силова частина складається з таких функціональних вузлів:

Вхідний LC фільтр (L_{ϕ} , C_{ϕ}), який призначений для згладжування пульсацій струму, що споживаються з контактної мережі, та захисту IGB транзисторів від комутаційних перенапруг.

Тяговий 4 квадрантний DC-DC перетворювач (П1), виконаний на чотирьох IGB-транзисторах (Q1–Q4) із зустрічно-паралельними діодами. У діагональ моста включено якор тягового двигуна (Я). Цей вузол дозволяє керувати полярністю напруги на якорі та величиною напруги та струму.

4 квадрантний DC-DC перетворювач забезпечує можливість роботи електроприводу в тяговому та гальмівному режимах причому забезпечує реверс.

Принцип роботи тягового 4 квадрантного DC-DC перетворювач наведено на рис. 2.2.

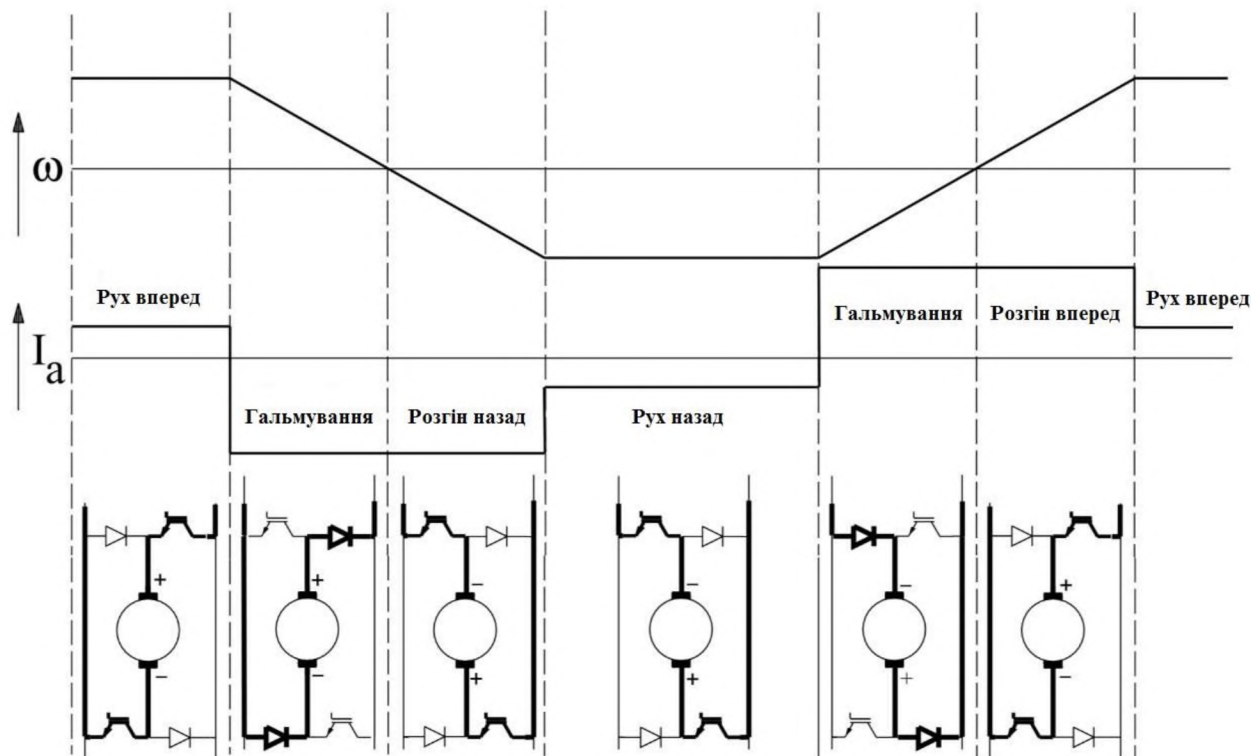


Рисунок 2.2 - Принцип роботи 4 квадрантного DC-DC перетворювача [8]

Але для коректної роботи цього приводу є умова незмінності напрямку магнітного потоку обмотки збудження, а саме струму, для цього до обмотки збудження було підключено випрамний міст.

Вузол збудження (B1), який являє собою діодний випрамний міст (VD1–VD4), у діагональ якого включена обмотка збудження (O3). Вхід змінного струму моста підключено послідовно в силове коло якоря двигуна. Цей вузол забезпечує однаковий напрямок протікання струму через обмотку збудження незалежно від напрямку струму в якорі двигуна, що дозволяє реалізувати реверс і електричне гальмування, оскільки дозволяє зберегти полярність магнітного потоку при зміні полярності напруги на якорі. [5]

Двонаправлений DC-DC перетворювач (П2) виконаний на двох IGB-транзисторах із зустрічно-паралельними діодами. Цей вузол використовується у якості двонаправленого пристрою зарядки/розрядки батареї, оскільки він

може керувати величиною напруги та струму суперконденсатора підлаштовуючись під необхідні параметри.

Принцип роботи двонаправленого DC-DC перетворювача більш детально розглянемо на основі схеми приведений на рис. 2.3. Цей перетворювач підключений до спільної шини постійного струму, напруга v_{bus} на якій у будь яких режимах роботи електропривода завжди позитивна, як і напруга на накопичувачі енергії v_{batt} . Коли накопичувач необхідно зарядити, то IGB транзистор Q_1 та діод D_2 по черзі проводять струм і струм i_L позитивний і спрямований до накопичувача енергії, а коли накопичувач необхідно розряджати, то IGB транзистор Q_2 та діод D_1 по черзі проводять струм, таким чином і струм i_L негативний і спрямований до мережі. [12]

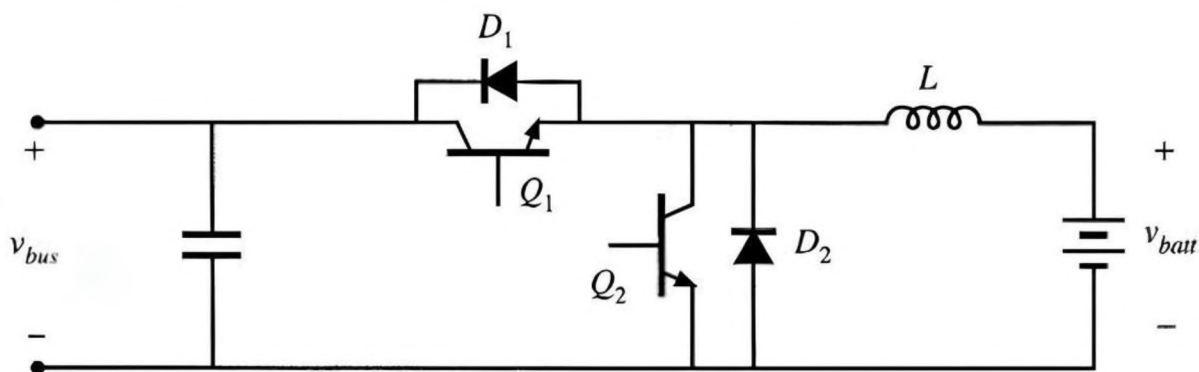


Рисунок 2.3 - Схема двонаправленого DC-DC перетворювача
Розглянемо тяговий і гальмівний режим більш детально.

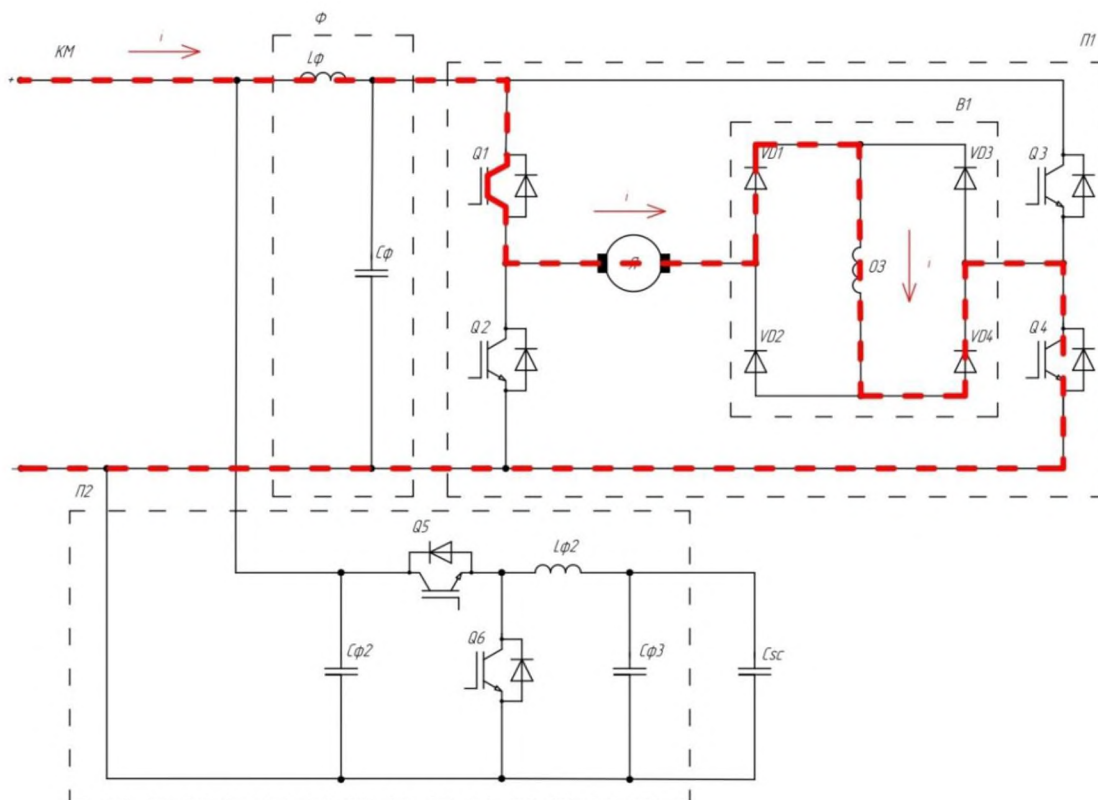


Рисунок 2.4 - Функціональна схема електропривода електровоза у тяговому режимі

У тяговому режимі працює діагональна пара транзисторів Q1 та Q4. Транзистори Q2 та Q3 — закриті. Струм протікає від «плюса» джерела через фільтр, транзистор Q1, якор двигуна, вхід моста B1 (діод VD1), обмотку збудження, вихід моста B1 (діод VD4), транзистор Q4, «мінус» джерела (рис.2.2).

Змінюючи коефіцієнт заповнення γ керуючих імпульсів на затворах Q1, Q4, ми плавно регулюємо середню напругу на двигуні, забезпечуючи безреостатний пуск та регулювання швидкості.

У режимі рекуперативного гальмування двигун перетворюється на генератор, для чого розмикається контактор KM і за рахунок залишкового магнітного потоку двигун самозбуджується і гальмівний струм проходить по ланці: «Якор, зустрічно-паралельний діод Q1, фільтр, двонаправлений DC-DC перетворювач (Π2), котрий заряджає суперконденсатор C_{sc} , зустрічно-паралельний діод Q4, діод VD3, обмотку збудження, діод VD2, якор» (рис.2.3).

Для реалізації рекуперативного гальмування та стратегії збільшення короткочасної потужності схема доповнюється блоком суперконденсаторів, який підключається паралельно до ланки постійного струму через двонапрямлений DC/DC перетворювач.

Під час гальмування енергія, що повертається від двигуна через діоди моста П1, спрямовується DC/DC перетворювачем у суперконденсатор, заряджаючи його.

Якщо струм двигуна перевищує певний ліміт мережі, DC/DC перетворювач переходить у режим розряду, додаючи необхідний струм з суперконденсатора.

Така структура дозволяє ізолювати контактну мережу від пікових навантажень та забезпечити автономне живлення власних потреб електровоза при короткочасному зникненні напруги.

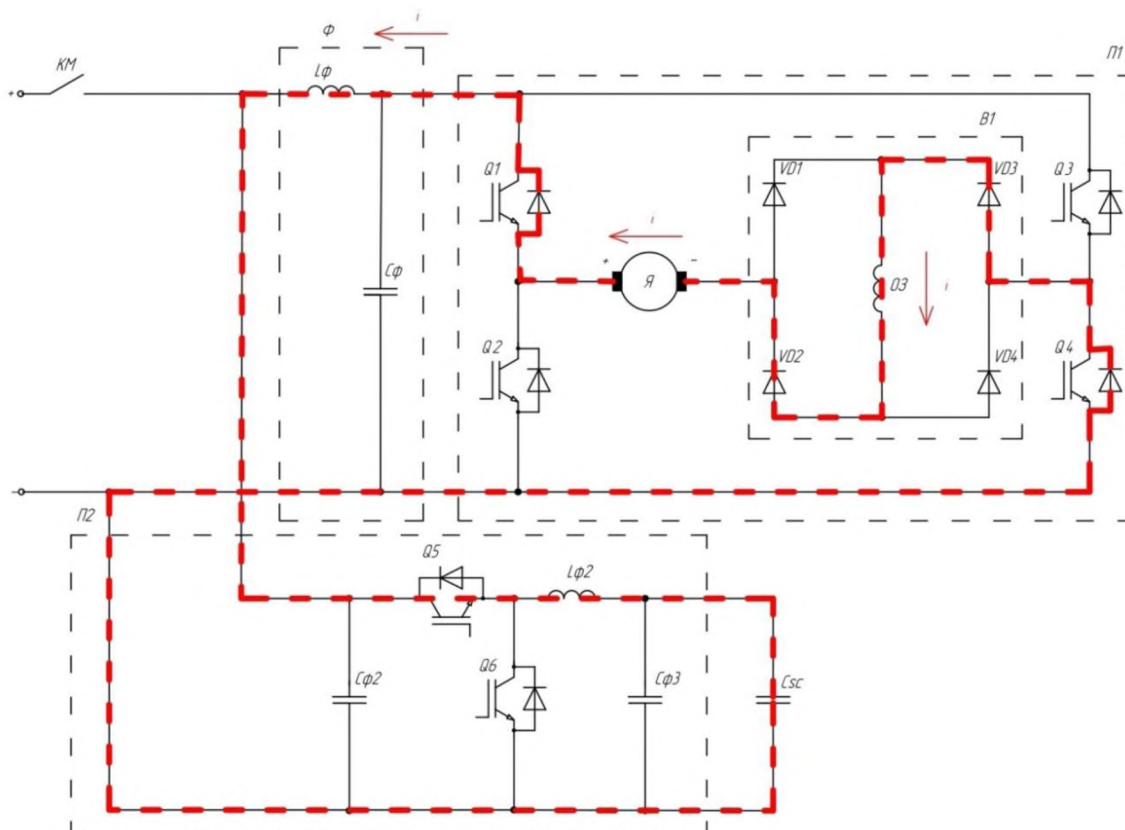


Рисунок 2.5 - Функціональна схема електропривода електровоза у режимі рекуперативного гальмування

Особливістю даного виду рекуперативного гальмування є неможливість повної зупинки електровоза лише за рахунок електричного гальмування і потребує використання існуючих механічних гальм через зникнення самозбудження на швидкості 0,3 м/с ($\approx 1,1$ км/год).

2.2. Вибір бортового накопичувача енергії та розрахунок його параметрів

На основі проведеного аналізу недоліків існуючих систем керування та специфіки електропостачання підземного транспорту, для підвищення ефективності функціонування електровоза К10 необхідно визначити найоптимальніший тип накопичувача енергії.

Специфіка роботи шахтного електровоза визначає ключові вимоги до системи накопичення, а саме здатність приймати та віддавати великі струми (до 200–300 А) протягом короткого часу (10–20 с), мати високий циклічний ресурс та високу безпеку експлуатації.

Розглянемо основні сучасні накопичувачі енергії електрохімічні акумуляторні батареї (LiFePO_4) та електричні конденсатори подвійного шару (суперконденсатори).

Необхідно зазначити що електровоз К10 працює у повторно-короткочасному режимі з частотою пусків 30–40 разів на годину для деяких технологічних процесів навіть більше, наприклад при маневрових роботах. Для акумуляторних батарей такий режим з частими пусками, що супроводжується великими струмами призводить до швидкої деградації та скорочення терміну їх служби. Суперконденсатори, що базуються на електростатичному принципі, витримують понад 1 мільйон циклів заряду-розряду без втрати ємності, що співрозмірно з терміном служби самого електровоза.

Оскільки головною метою модернізації є не великий автономний хід, а покриття пікових навантажень, то критично важливою є питома потужність (Вт/кг). Суперконденсатори мають цей показник у 10–20 разів вищий, ніж акумулятори, що дозволяє отримати необхідні пускові струми при значно менших габаритах і вазі накопичувача.

Також суперконденсатори зберігають працездатність у широкому діапазоні температур (від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$), що є важливим для умов шахти, де можливі перепади температур.

Отже найбільш доцільним буде використання суперконденсаторного блоку. Він виконуватиме функцію так буфера потужності, розвантажуючи мережу під час пуску та поглинаючи енергію при гальмуванні.

Виконаємо розрахунок параметрів системи накопичення енергії, а саме енергоємності накопичувача та вибір конфігурації конденсаторної батареї.

1) Визначення необхідної енергоємності

Накопичувач повинен бути здатен поглинути кінетичну енергію поїзда при гальмуванні з максимальної швидкості до швидкості кінця самозбудження двигуна під час рекуперативного гальмування $v_{\min}=1,1$ км/год. Для цього розрахуємо два випадки: коли електровоз з вагонами рухається порожнім зі швидкістю $v_{\max1}=18$ км/год (5 м/с) і коли електровоз з 8 вагонами заповненими рудою рухається порожнім зі швидкістю $v_{\max2}=12,3$ км/год (3,42 м/с)

Маса порожнього електровоза з вагонами ВГ-4:

$$m_{\text{пор}} = m_{K10} + Nm_e = 10000 + 8 \cdot 4200 = 43600 \text{ кг} \quad (2.1)$$

де m_{K10} - маса електровоза, 10000кг;

m_e - маса вагона ВГ-4 4200кг;

N - кількість вагонів;

Маса завантаженого електровоза з вагонами ВГ-4:

$$m_{\text{з2}} = m_{K10} + N(m_e + m_p) = (10000 + 8 \cdot (4200 + 10000)) = 123600 \text{ кг} \quad (2.2)$$

де m_p - маса руди у вагоні ВГ-4, 10000кг;

Кінетична енергія порожнього електровоза:

$$E_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{пор}}(v_{\max1}^2 - v_{\min}^2)}{2} = \frac{43600 \cdot (5^2 - 0,3^2)}{2} = 543,038 \text{ кДж} \quad (2.3)$$

Кінетична енергія завантаженого електровоза:

$$E_{\text{з2}} = \frac{m_{\text{з2}}(v_{\max2}^2 - v_{\min}^2)}{2} = \frac{123600 \cdot (3,42^2 - 0,3^2)}{2} = 717,275 \text{ кДж} \quad (2.4)$$

Отже для подальшого розрахунку виберемо варіант з більшою кінетичною енергією, тобто $E_{32} = 717,275 \text{ кДж}$

Частина цієї енергії втрачається на подолання основного опору руху під час вибігу та гальмування, а також на теплові втрати в перетворювачі. Прийmemo коефіцієнт рекуперації системи $\eta_p = 0.85$ (враховуючи механічні втрати та ККД перетворювача).

$$E_{32} \eta_s = 717,275 \cdot 0,85 = 609,7 \text{ кДж} \quad (2.5)$$

Робочий діапазон напруг суперконденсаторного блоку обрано з урахуванням узгодження з напругою контактної мережі (250 В), а саме $U_{\max} = 250 \text{ В}$, $U_{\min} = 150 \text{ В}$.

Необхідна електрична ємність батареї C визначається за формулою:

$$W = \frac{C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)}{2} \quad (2.6)$$

Звідси знаходимо:

$$C = \frac{2W}{(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)} = \frac{2 \cdot 609700}{(250^2 - 150^2)} = 30,485 \text{ Ф} \quad (2.7)$$

Для забезпечення запасу надійності та компенсації старіння конденсаторів (зниження ємності з часом), приймаємо розрахункову ємність $C_p = 30,5 \text{ Ф}$.

Отже для формування високовольтної батареї доцільно використовувати промислові комірки великої ємності. Обрано суперконденсатори серії Maxwell K2 (модель ВСАР3000 Р270), які широко застосовуються у автомобілебудуванні та іншого важкого транспорту. Технічні характеристики наведені у табл.2



Рисунок 2.6 - Суперконденсатор Maxwell K2 BCAP3000 P270 [7]

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики суперконденсатора серії Maxwell K2 BCAP3000 P270

Найменування параметра	Позначення	Значення
Номінальна ємність	C_k	3000Ф
Номінальна напруга	U_k	2,7 В
Максимальний струм	I_{imp}	2165А
Номінальний струм	I_H	170А
Внутрішній опір	$R_{вн}$	0,29 мОм

Розрахунок кількості послідовно з'єднаних елементів (N):

$$N = \frac{U_{max}}{(U_k \cdot k_z)} = \frac{250}{(2,7 \cdot 0,96)} = 96,45 \quad (2.8)$$

Кількість елементів визначається максимальною напругою системи ($U_{max} = 250$ В) з урахуванням коефіцієнта запасу k_z по напрузі.

Приймаємо кількість елементів $N_s = 97$ шт.

Розрахунок результуючої ємності батареї:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_k}{N_s} = \frac{3000}{97} = 30,92\Phi \quad (2.9)$$

Отримане значення повністю задовольняє вимогу ($C_{\Sigma} > C_p$).

Перевіримо суперконденсаторний модуль за струмом. Максимальний струм, що протікає через накопичувач у системі, становить близько 150 А.

Комірки ВСАР3000 розраховані на тривалий струм до 170 А і піковий до 2000 А. Отже, одна паралельна гілка повністю забезпечує струмові режими роботи без перегріву.

2.3. Синтез системи автоматичного керування електроприводом

Система керування будується за принципом підлеглого регулювання. Цей дозволяє обмежити фізичні величини (наприклад, струм якоря) на безпечному рівні та спростити налаштування кожного контуру. [4]

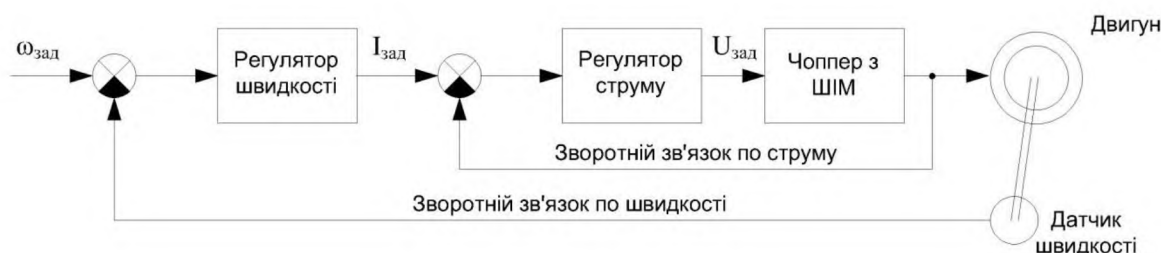


Рисунок 2.7 - Система підлеглого керування

Структура САК двигуна складається з двох контурів (рис.2.7) внутрішнього контуру струму якоря, який забезпечує пряме керування моментом і зовнішній контур швидкості, який формує завдання на струм.

Синтезуємо регулятор струму (РС):

Об'єктом керування в контурі струму є якірне коло двигуна. Сумарний опір якірного кола (з урахуванням послідовного збудження) для двигуна ДТН-33/20 становить:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{з}} = 0,126 \text{ Ом} \quad (2.10)$$

Електромагнітна стала часу якоря:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = 0,044 \quad (2.11)$$

Передавальна функція об'єкта керування по струму (двигуна та перетворювача):

$$W_{oc}(p) = \frac{k_{ТП}}{R_{\Sigma}(T_e p + 1)} \quad (2.12)$$

де $k_{ТП}$ - коефіцієнт підсилення перетворювача (прийmemo $k_{ТП} = 1$)

Налаштування регулятора струму виконується за модульним оптимумом.
Обираємо ПІ-регулятор струму з передатною функцією:

$$W_{PTMO}(p) = \frac{R_{\Sigma}(T_{\mu}p + 1)}{k_{PI}2T_{\mu}p} \quad (2.13)$$

де T_{μ} - некомпенсована постійна часу (прийmemo $T_{\mu} = 0,01c$)

Отже параметри регулятора струму рівні:

$$W_{PTMO}(p) = \frac{0,126 \cdot 0,044}{2 \cdot 0,01} + \frac{0,126}{2 \cdot 0,01p} = 0,277 + \frac{6,3}{p}$$

Прийmemo $k_{PI} = 0,277$, а $k_{PI} = 6,3$

Синтез регулятора швидкості

Зовнішній контур регулює швидкість. Об'єктом керування тут є механічна частина приводу, а саме маса поїзда, зведена до валу двигуна. Передавальна функція розімкненого контуру швидкості включає оптимізований контур струму та механічну частину електровоза:

$$W_{OSH}(p) = \frac{R_{\Sigma}}{T_M k_e p} \quad (2.14)$$

де T_M - механічна постійна часу

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} R_{\Sigma}}{k_M k_e} = \frac{58,1 \cdot 0,126}{1,97 \cdot 2,1} = 1,77c \quad (2.15)$$

де J_{Σ} - сумарний момент інерції приводу

$$J_{\Sigma} = J_{\partial e} + 0,5J_{\text{составу}} = J_{\partial e} + 0,5m \frac{R_k^2}{i^2} = 0,76 + 0,5 \cdot 123000 \frac{0,335^2}{210,97^2} = 58,1 \frac{кг \cdot м^2}{м^2} \quad (2.16)$$

k_e - коефіцієнт ЕРС:

$$k_e = \frac{U_n - I_n R_{\Sigma}}{\omega_n} = \frac{30(U_n - I_n R_{\Sigma})}{\pi n_n} = \frac{30(250 - 152 \cdot 0,126)}{3,14 \cdot 1050} = 2,1 \frac{Вс}{рад} \quad (2.17)$$

k_M - коефіцієнт моменту двигуна

$$k_M = \frac{M_n}{I_n} = \frac{P_n}{\omega_n I_n} = \frac{33000}{110 \cdot 152} = 1,97 \frac{рад}{с} \quad (2.18)$$

Для контуру швидкості використовуємо налаштування за модульним оптимумом. Обираємо П-регулятор струму з передатною функцією:

$$W_{PIIMO}(p) = \frac{T_M k_e}{R_\Sigma 2T_\mu} \quad (2.19)$$

де $T_{\mu 2}$ - некомпенсована постійна часу (прийmemo $T_{\mu 2} = 0,02c$)

Отже параметри регулятора струму рівні:

$$W_{PIIMO}(p) = \frac{1,77 \cdot 2,1}{0,126 \cdot 2 \cdot 0,02} = 737,5$$

Прийmemo $k_{PI2} = 737,5$

2.4. Розробка алгоритму керування накопичувачем енергії на базі суперконденсатора

Керування потоками потужності між контактною мережею, тяговим перетворювачем та суперконденсатором здійснюється за допомогою двонаправленого DC-DC перетворювача. Стратегія керування відрізняється від класичних систем, де зовнішній контур стабілізує напругу, у розробленій системі використано стратегію прямого керування струмом. Це зумовлено тим, що напруга на суперконденсаторі повинна вільно змінюватися в широких межах для накопичення та віддачі енергії. [11]

Система керування накопичувачем реалізує логіку роботи, спрямовану на захист контактної мережі від перевантажень та максимальне використання рекуперації (рис.2.8).

Алгоритм роботи системи включає три стани:

1) Збільшення короткочасної потужності:

Якщо струм споживання двигуна $I_{\partial\partial}$, приведений до ланки постійного струму, перевищує встановлений ліміт мережі I_{lim} , різниця покривається за рахунок розряду суперконденсатора.

$$I_{sc} = I_{\partial\partial} - I_{lim}, \text{ при } I_{\partial\partial} > I_{lim} \quad (2.20)$$

Це дозволяє електровозу розвивати двигуну більший пусковий момент, не перевантажуючи мережу.

2) Рекуперативне гальмування:

При переході в режим гальмування ($I_{дв} < 0$) система розмикає лінійний контактор, відключаючи електровоз від мережі. Весь струм рекуперації спрямовується в суперконденсатор.

$$I_{sc} = I_{дв} \quad (2.21)$$

3) Режим підзарядки та режим очікування:

Режим підзарядки активується під час руху електровоза або під час стоянки, якщо виконуються умови:

Струм навантаження менший за ліміт мережі ($I_{лім} - I_{дв} \geq I_{сзар}$)

Напруга суперконденсатора нижча за необхідну напругу ($U_{sc} < U_3$)

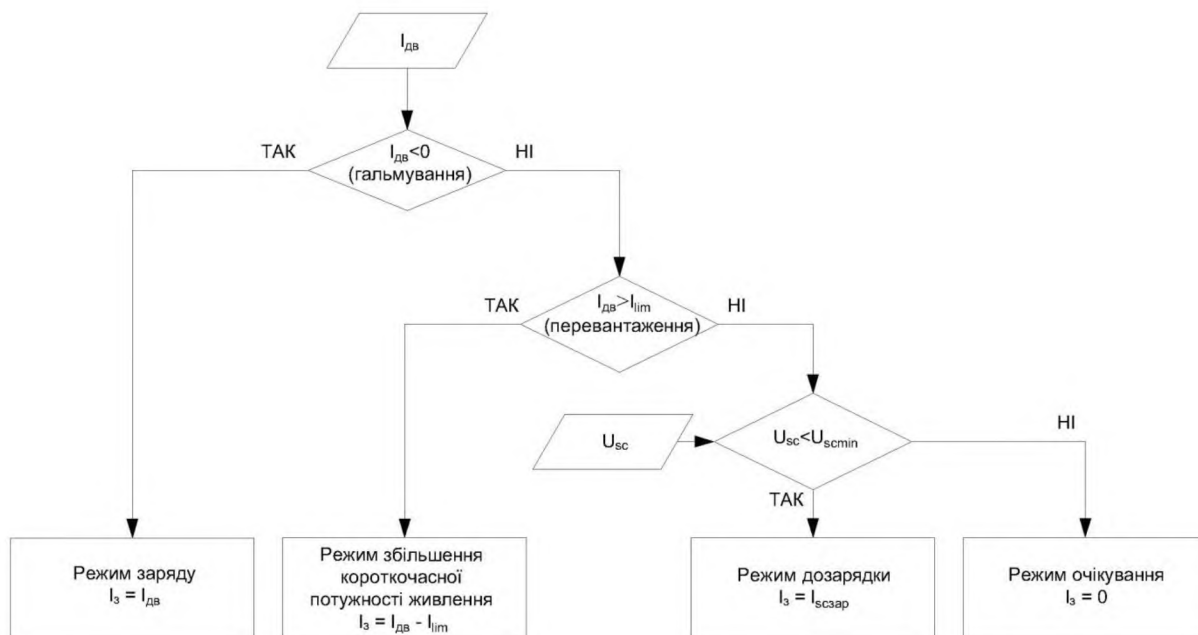


Рисунок 2.8 - Схема стратегії керування накопичувачем енергії

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі розроблено функціональну схему силової частини електроприводу на базі 4-квADRантного перетворювача, яка дозволяє реалізувати безконтактне керування струмом та рекуперацію енергії.

Було виконано вибір бортового накопичувача енергії та розраховано його параметри. Обрано суперконденсатори серії Maxwell K2 (модель BCAP3000 P270), які широко застосовуються у машинобудуванні.

Розроблено систему керування електроприводом за принципом підлеглого регулювання, а також розроблено алгоритми керування накопичувачем енергії на базі суперконденсатора.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕТОДАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Розробка та дослідження моделі існуючої системи керування електроприводом електровоза К10

Для порівняльного аналізу та обґрунтування доцільності підвищення ефективності функціонування електровоза запропонованою системою, було розроблено імітаційну модель існуючої системи керування електровоза К10.

Модель розроблено у середовищі Matlab/Simulink. Оскільки реальний електропривод має два двигуни для спрощення моделювання схема була побудована з одним двигуном і враховано відповідні рівні опору пускових резисторів, навантаження та напруги, причому існуюча система керування передбачає на початку пуску послідовне з'єднання двигунів.

Структура моделі (рис. 3.1) імітує силову схему електровоза і складається з джерела живлення, блоку двигуна постійного струму послідовного збудження ДТН-33/20, параметри якого налаштовані відповідно до паспортних даних, а також система ідеальних ключів (контакторів), алгоритм перемикання яких налаштовано за часом, що відповідає реальній роботі контролера машиніста.

Розроблено блок пускових резисторів, який складається з набору активних опорів, що імітують пусковий реостат рис 3.2.

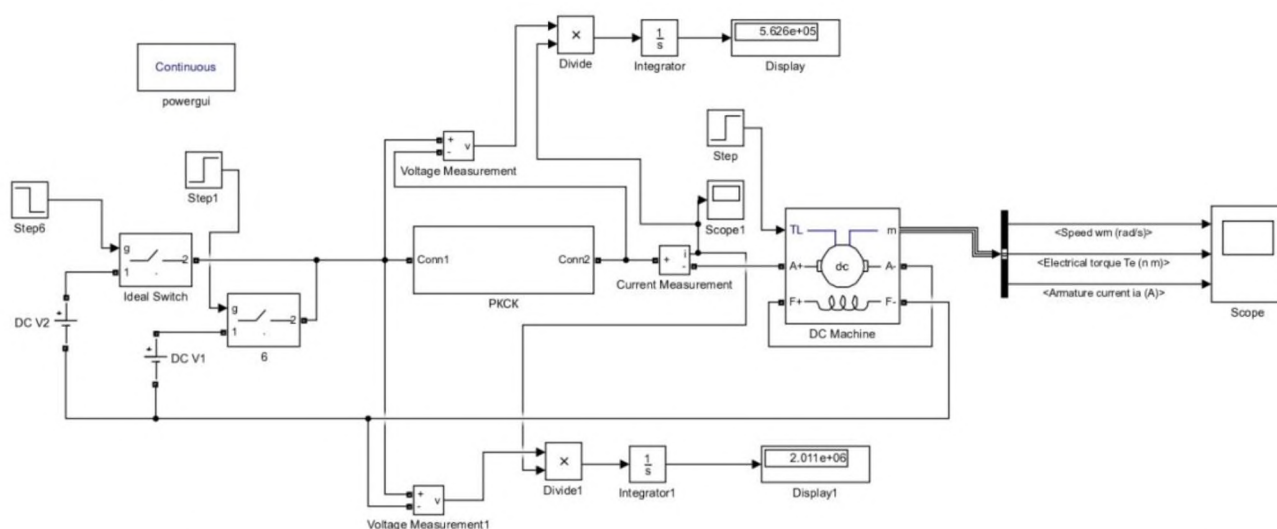


Рисунок 3.1 - Імітаційна модель реостатно-контакторної системи керування в середовищі Simulink

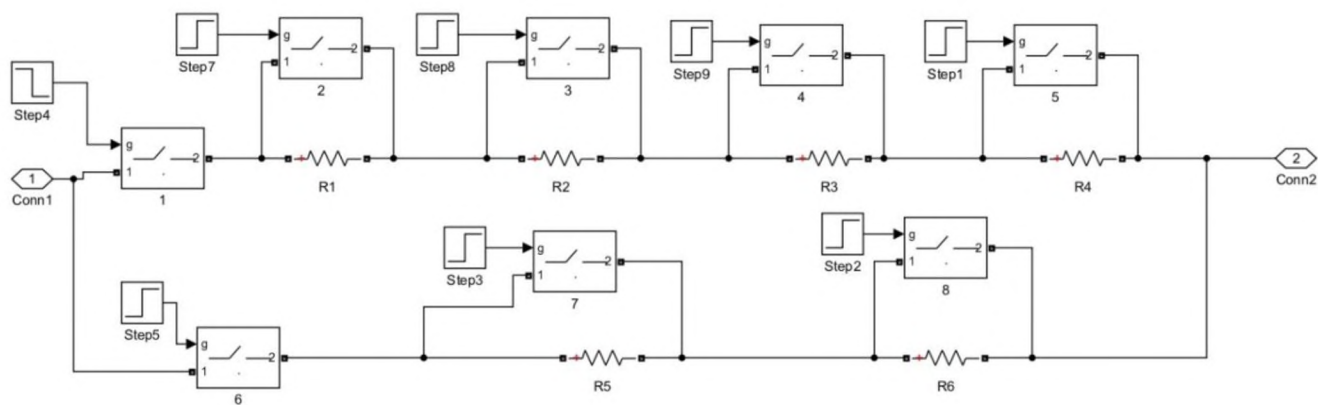


Рисунок 3.2 - Блок пускових резисторів

Результати моделювання пуску електровоза з вагонами навантаженими рудою до номінальної швидкості наведено на рис. 3.3. Аналіз графіків дозволяє виділити характерні особливості роботи РКСК.

На графіку струму якоря чітко спостерігається яскраво виражений пілкоподібний характер процесу. Розгін відбувається ступінчато, бо при почерговому замиканні кожного контактора і виведенні секції реостата опір кола різко зменшується, що призводить до миттєвого стрибка струму. По мірі розгону електровоза зростає електрорушійна сила двигуна, і струм плавно спадає до моменту перемикавання на наступну позицію.

Оскільки обертаючий момент двигуна послідовного збудження пропорційний струму, графік моменту також має пульсуючий характер.

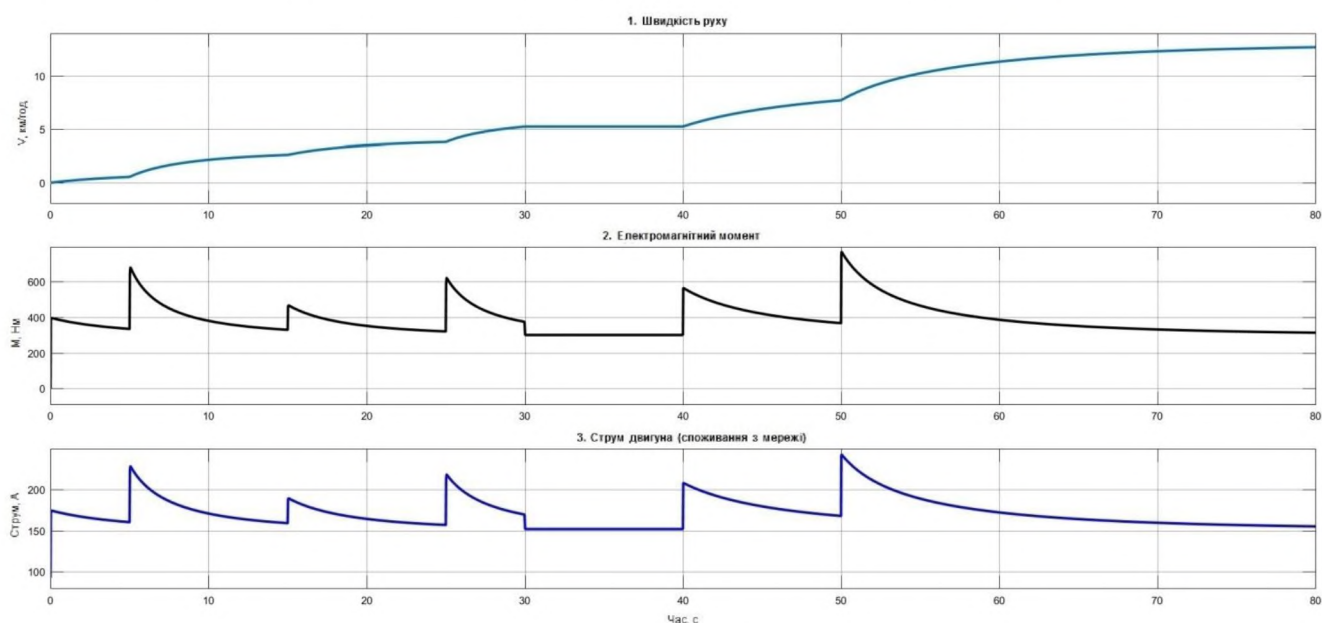


Рисунок 3.3 - Пуск електровоза з РКСК

Моделювання показало, що для забезпечення середнього пускового прискорення, необхідного для зрушення важкого поїзда, пікові значення струму в моменти комутації досягають 240-280 А, а в окремих випадках (при форсованому розгоні) перевищують 300 А.

Такі струмові удари призводять до різких стрибків моменту, що викликає ударні навантаження на зуби тягового редуктора, муфти та зчіпні пристрої, це в свою чергу призводить до передчасного виходу обладнання з ладу.

Також у моменти піків сила тяги може перевищити силу зчеплення коліс з рейками, що спричиняє буксування та знос бандажів колісних пар.

Суттєвим недоліком досліджуваної системи є принцип регулювання напруги. Уся надлишкова напруга мережі гаситься на пускових резисторах і розсіюється у вигляді тепла. Моделювання показало що за весь пуск електровоза пускові реостати спожили 30% усієї енергії.

Моделювання підтвердило, що існуюча система РКСК, хоч і є простою в реалізації, не задовольняє сучасним вимогам енергоефективності та надійності. Ступінчатий характер регулювання призводить до значних електричних та механічних перевантажень, що обґрунтовує необхідність переходу на систему плавного імпульсного регулювання.

3.2. Розробка та дослідження запропонованої системи електроприводу електровоза

Для реалізації енергоефективного керування електровозом К10 запропоновано структуру тягового електроприводу, що базується на широтно-імпульсному регулюванні напруги та використанні бортової системи накопичення енергії. Розроблена математична модель дозволяє дослідити електромагнітні та електромеханічні процеси в системі «Контактна мережа – Перетворювач – Двигун – Суперконденсатор».

Для візуалізації структури силових кіл та перевірки принципів комутації було розроблено структурні моделі модернізованого електроприводу в середовищі MATLAB/Simulink.

На рис. 3.4 представлена модель тягового електроприводу з імпульсним перетворювачем. Основним елементом є блок чотирьохквadrантного DC/DC перетворювача (Four Quadrant DC-DC Converter), який живиться від джерела постійної напруги через модель лінії з активним опором R_m . Перетворювач забезпечує плавне регулювання напруги на якорі двигуна постійного струму послідовного збудження (DC Machine). Керування транзисторними ключами здійснюється блоком DC motor control, що реалізує підпорядковане регулювання струму та швидкості.

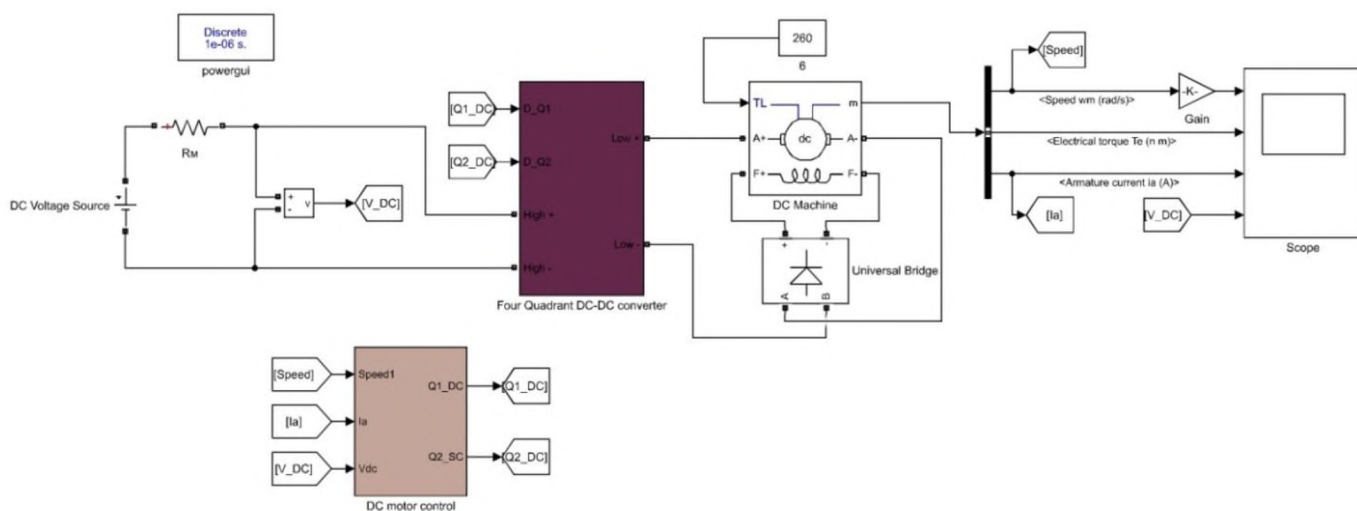


Рисунок 3.4 - Структурна модель тягового електроприводу (без накопичувача)

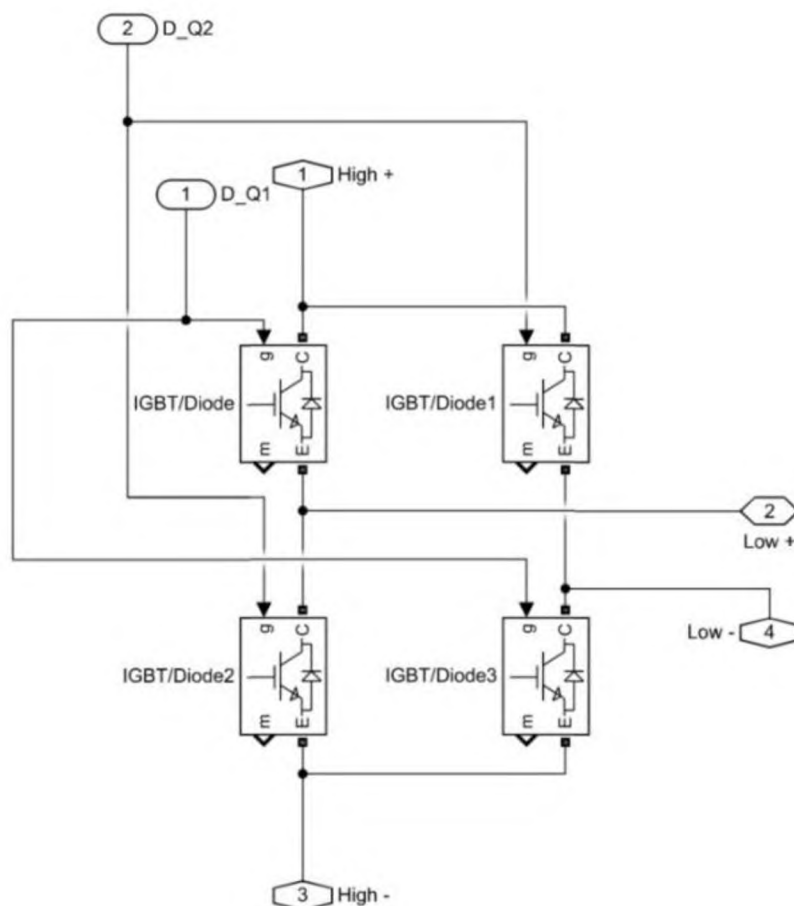


Рисунок 3.5 - Блок чотирьохквadrантного DC/DC перетворювача

Також у моделі враховано роботу електровоза на межі зчеплення ($F_{\text{тяги}} \approx F_{\text{зчеп}}$).

На основі розробленої математичної моделі було отримано графіки швидкості руху електровоза (рис.3.6), моменту двигуна (рис.3.7), струму двигуна (рис.3.8), а також. просадку напруги у мережі (рис.3.9)

Для забезпечення прийнятної динаміки розгону (досягнення швидкості 12 км/год за 25-30 с) електровоз змушений споживати струм до 280 А, що значно перевищує номінальні значення.

Критичним наслідком такого режиму є глибоке просідання напруги на струмоприймачі (рис.3.9), що підтверджує необхідність підвищення короточасної потужності за рахунок накопичувача енергії для ефективної експлуатації важких поїздів у протяжних шахтних мережах.

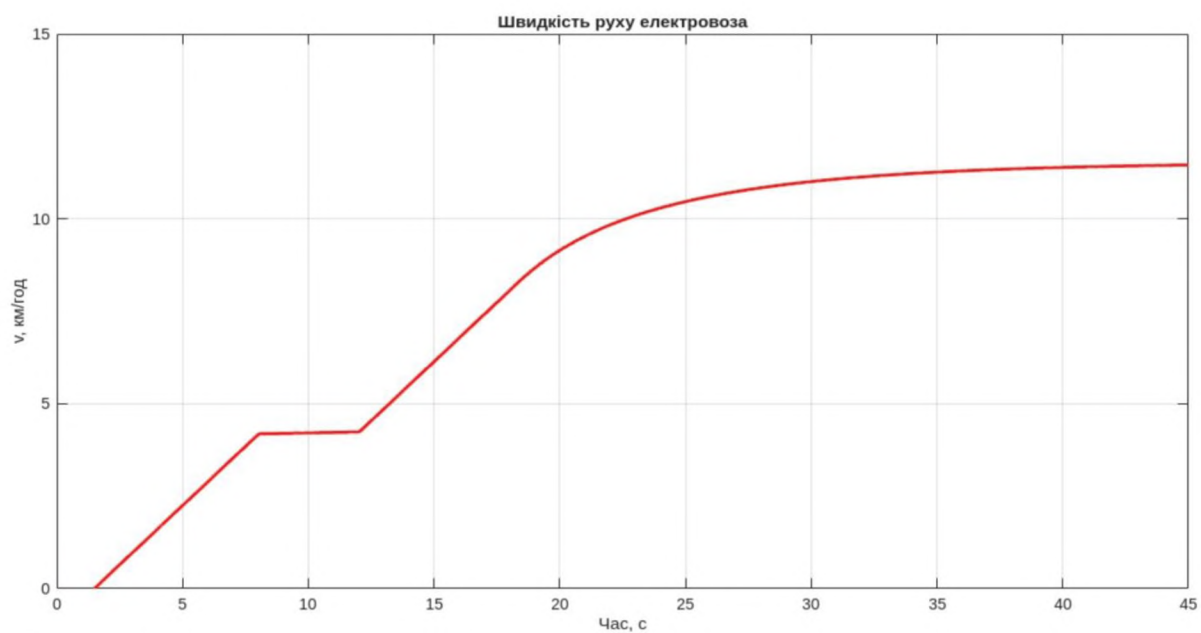


Рисунок 3.6 - Швидкість руху електровоза

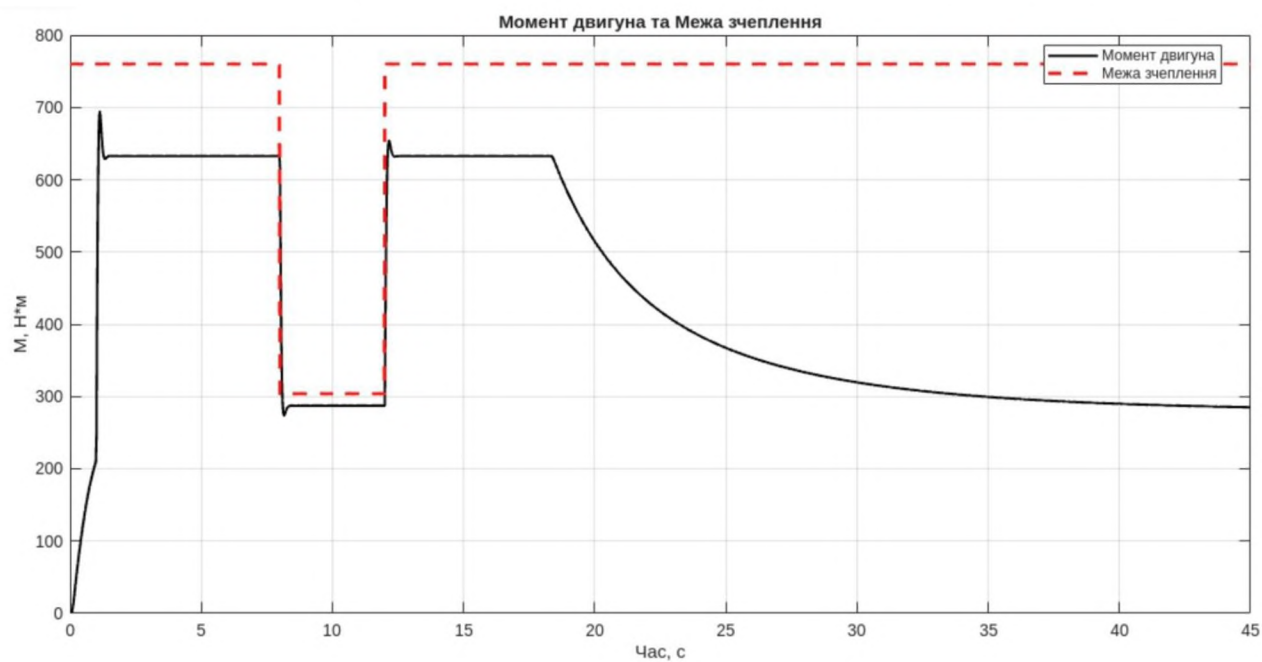


Рисунок 3.7 - Момент двигуна

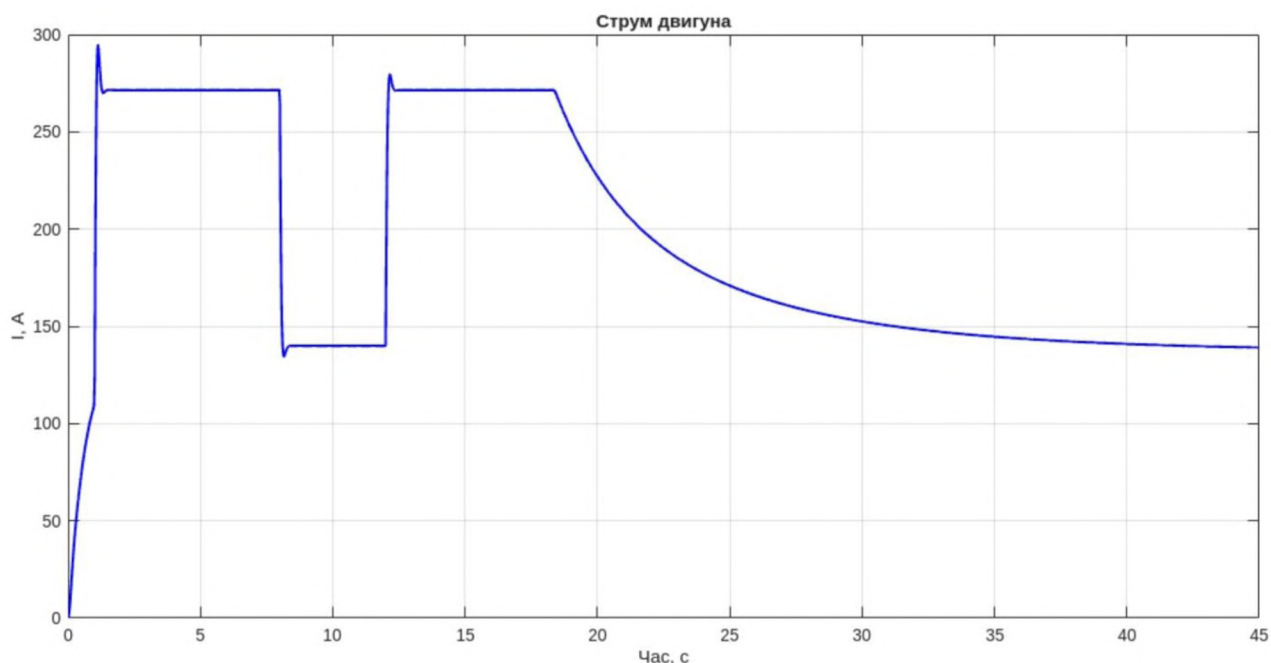


Рисунок 3.8 - Струм двигуна

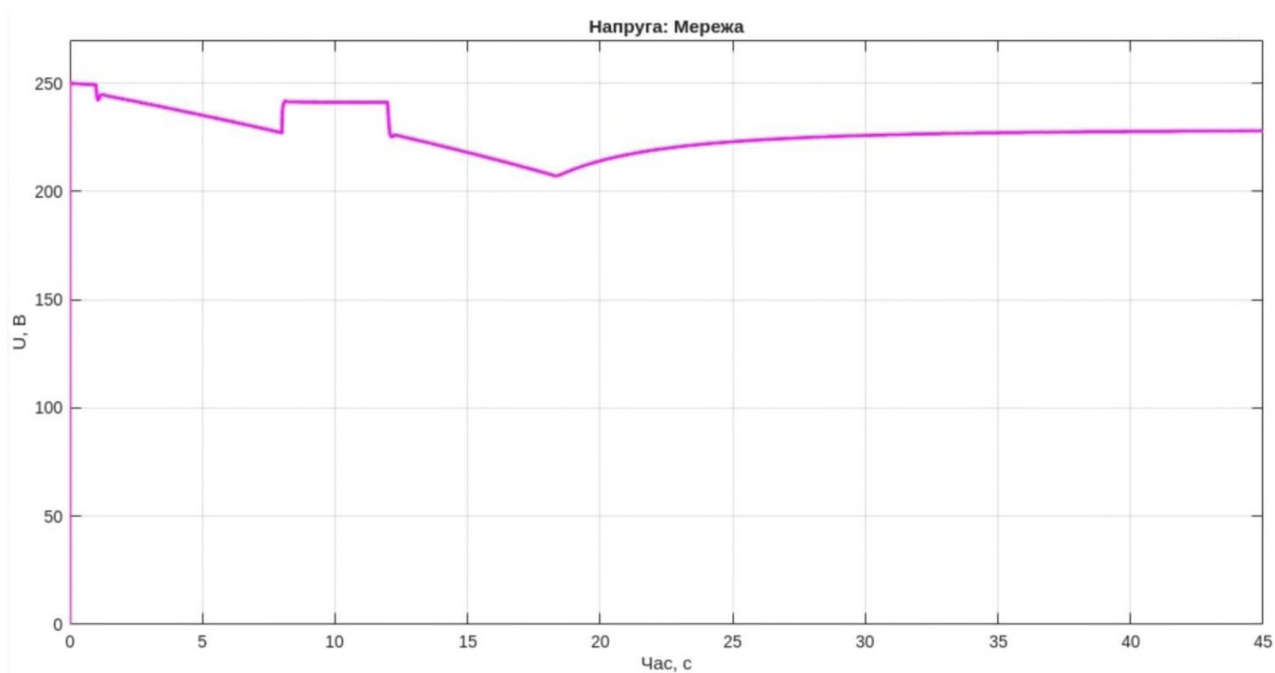


Рисунок 3.9 - Напруга мережі

Для реалізації функції підвищення короточасної потужності та рекуперації енергії, схема була доповнена блоком суперконденсаторів, підключеним до ланки постійного струму через двонапрямлений DC/DC перетворювач (рис. 3.10). Така структура дозволяє керувати потоками енергії між контактною мережею, тяговим двигуном та накопичувачем незалежно один від одного, забезпечуючи стабілізацію напруги мережі.

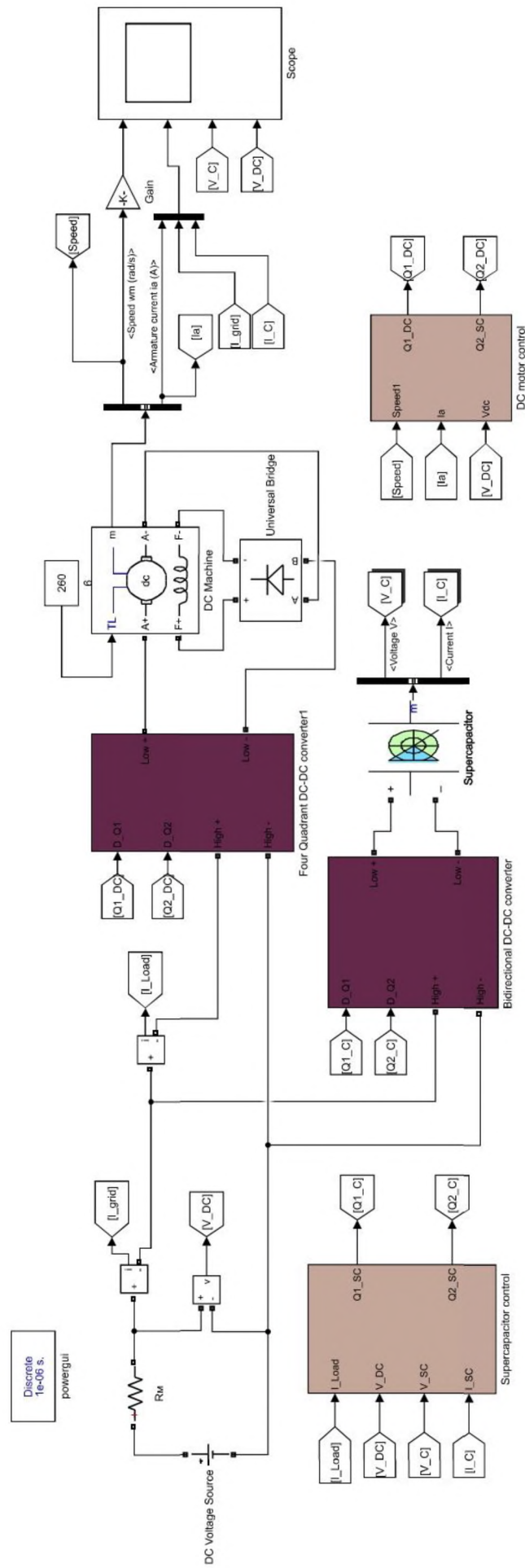


Рис. 3.10. Структурна модель модернізованого електроприводу з системою накопичення енергії

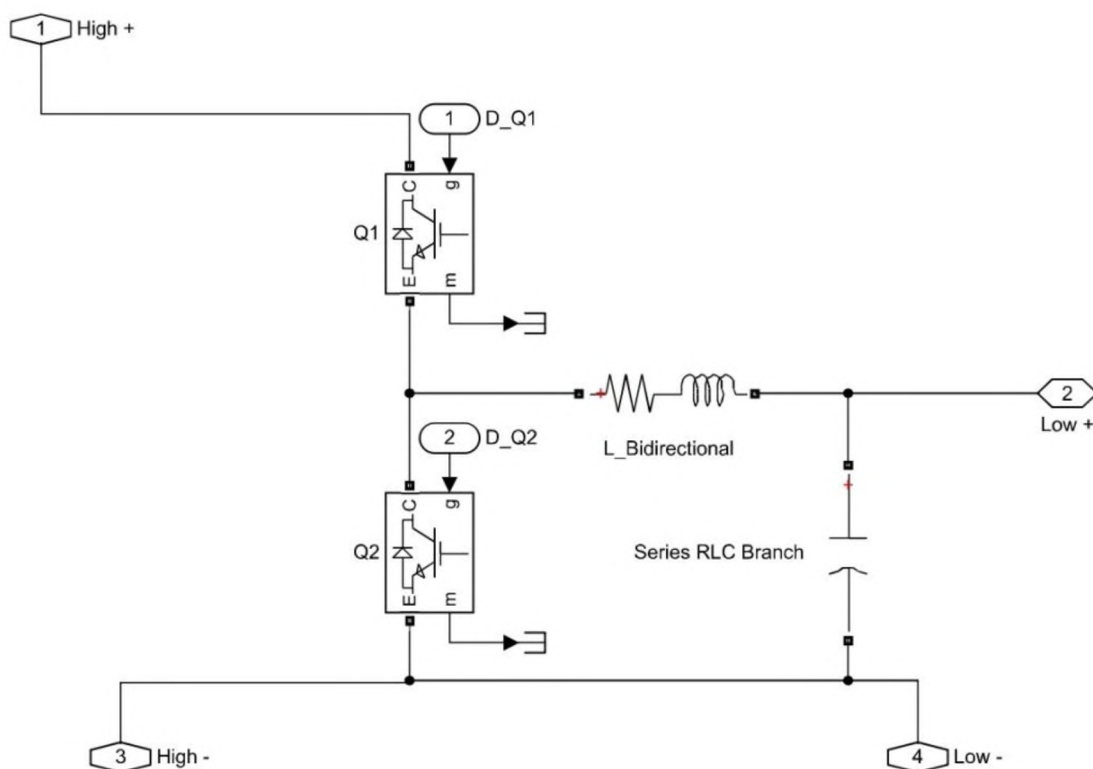


Рисунок 3.11 - Блок двонаправлений DC/DC перетворювач

На основі розробленої математичної моделі було отримано графіки швидкості руху електровоза (рис.3.11), розподіл енергетичних потоків (рис.3.12), а також напруги у джерел енергії (рис.3.13).

На графіку розподіл енергетичних потоків видно роботу стратегії збільшення короткочасної потужності.

Завдяки обмеженню струму мережі, напруга на струмоприймачі (графік 4) стабілізується на рівні не нижче 220 В, що відповідає нормам якості електроенергії.

В режимі гальмування потужність суперконденсатора змінює знак, а його напруга зростає, що свідчить про успішне повернення енергії в накопичувач.

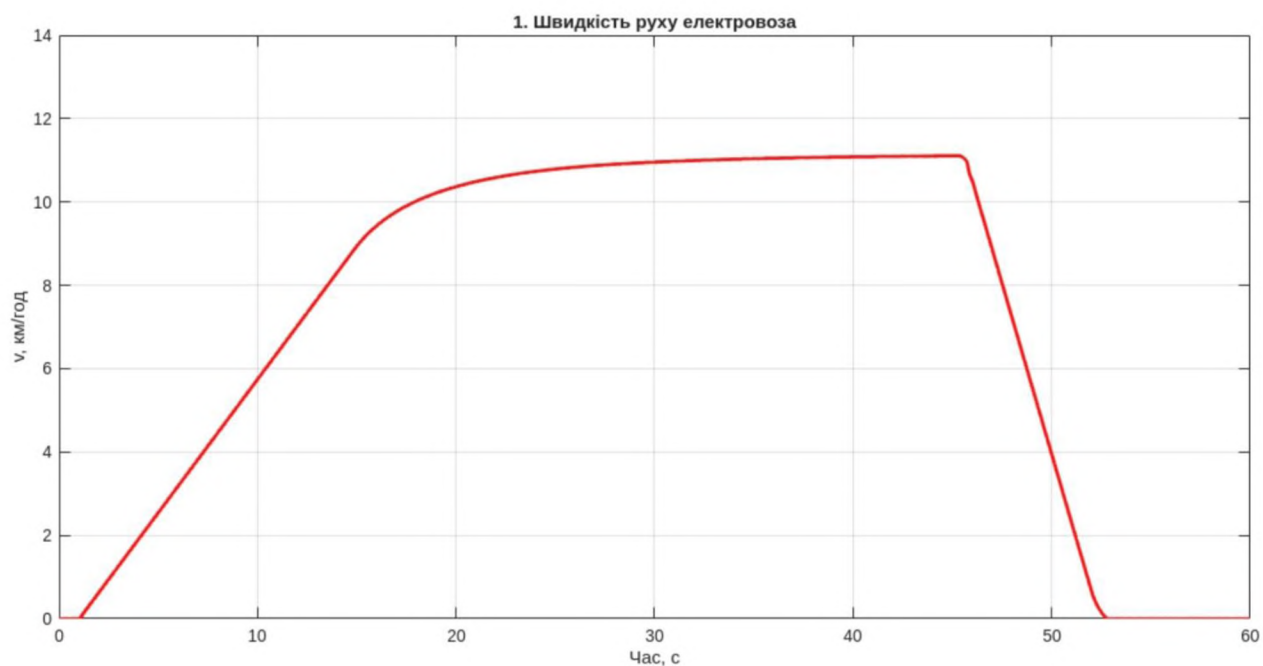


Рисунок 3.12 - Швидкість руху електровоза

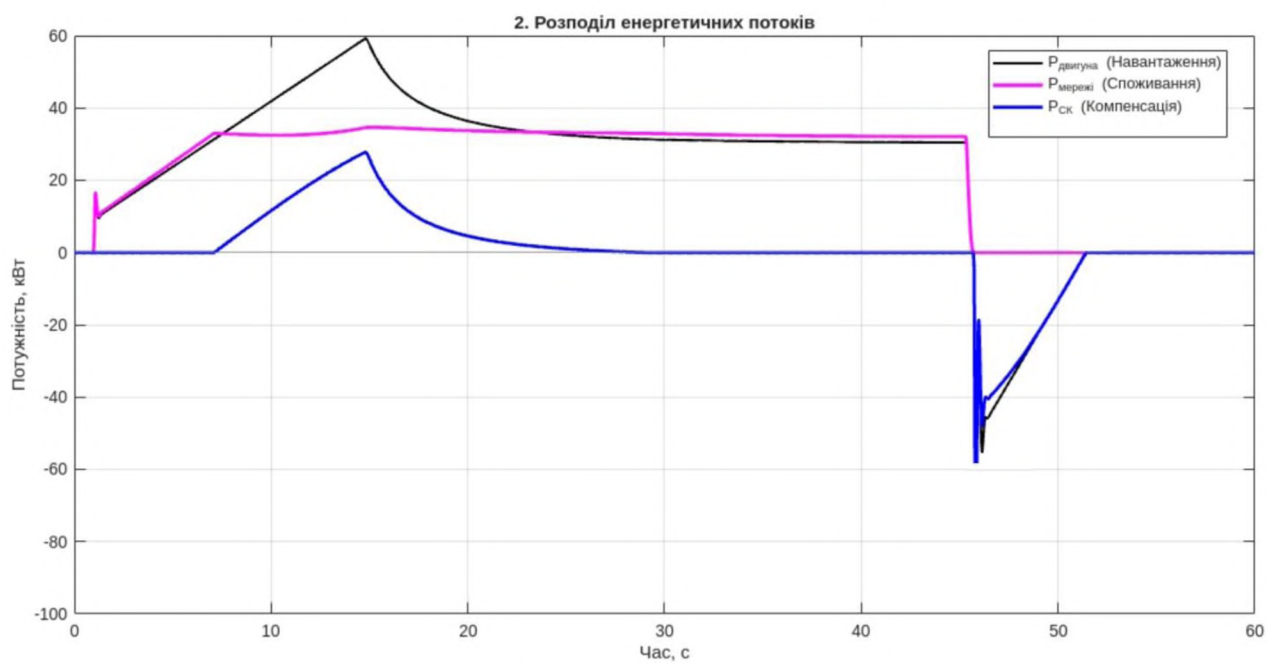


Рисунок 3.13 - Розподіл енергетичних потоків

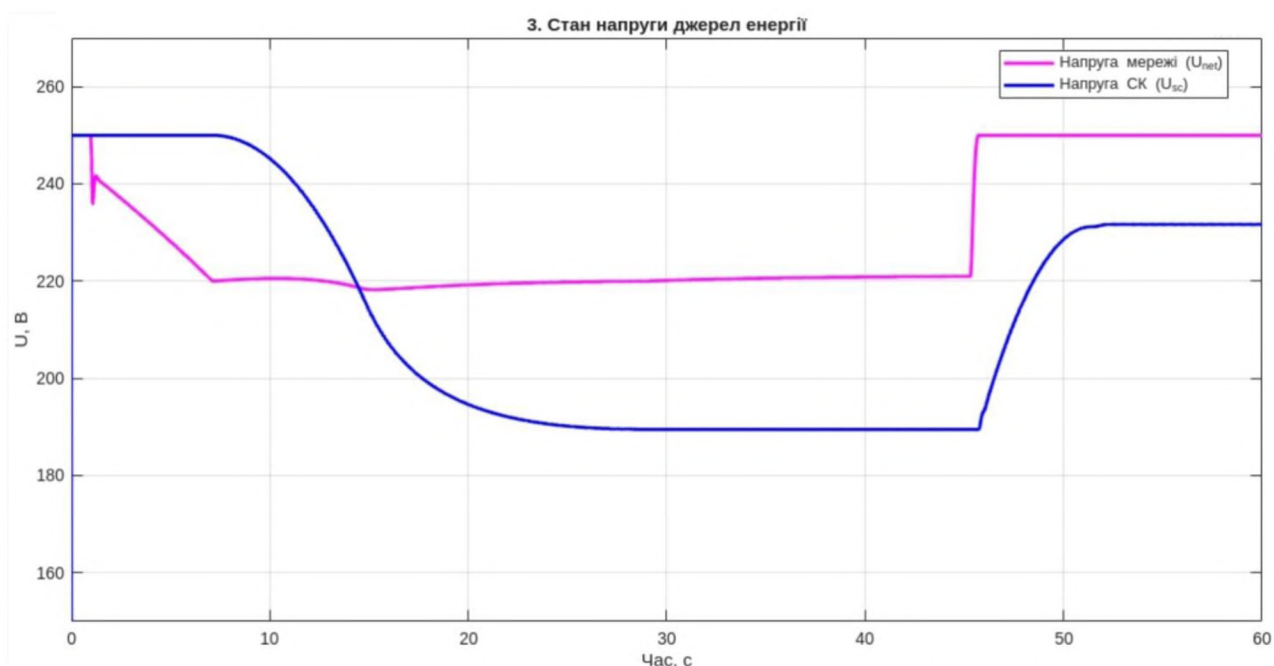


Рисунок 3.14 - Напруги джерел енергії

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих алгоритмів керування для вирішення проблем енергопостачання шахтного транспорту.

3.3. Порівняльний аналіз ефективності існуючої системи керування та запропонованої системи

1) Аналіз динамічних характеристик

Як видно з рис. 3.3, процес пуску супроводжується значними пульсаціями електромагнітного моменту. При перемиканні пускового реостата спостерігаються кидки моменту, що досягають 50–80% від номінального значення.

Пульсуючий момент викликає динамічні удари в тягових редукторах та люфтах зчіпних пристроїв вагонеток, що прискорює механічний знос обладнання. Через нерівномірність моменту середнє прискорення обмежується умовою зчеплення коліс з рейками. Пікові значення моменту часто призводять до зриву в буксування.

Використання ШІМ-регулювання дозволяє підтримувати електромагнітний момент стабільним протягом усього часу розгону. Відсутність ривків подовжує ресурс механічної частини.

Можливість реалізації тягового зусилля на межі зчеплення ($F_{\text{тяги}} \approx F_{\text{зчеп}}$) без ризику буксування дозволяє скоротити час розгону важкого поїзда на 15–20% порівняно з РКСК при тих самих пікових обмеженнях струму.

2) Вплив на якість електроенергії в контактній мережі

Оскільки протяжні шахтні контактні мережі характеризуються значним внутрішнім опором, то робота потужних електровозів суттєво впливає на рівень напруги.

Під час зрушення поїзда з місця можливі пікові струми до 280–300 А. Згідно з розрахунками, це призводить до миттєвого падіння напруги на струмоприймачі, таке просідання (більше 20%) є критичним і може спричинити збої в роботі електрообладнання.

Завдяки стратегії збільшення короткочасної потужності, струм, що споживається від контактної мережі, жорстко обмежений на рівні номінального струму двигуна. Пікові навантаження, необхідні для розгону, покриваються за рахунок розряду суперконденсатора, таким чином напруга в мережі стабілізується на номінальному рівні, що забезпечує відповідність нормам якості електроенергії.

3) Оцінка енергетичної ефективності

Розрахунок споживання енергії виконувався для повного циклу руху ($t = 23$ хв), що включає в себе декілька циклів розгону завантаженого рудою електровоза до номінальної швидкості, обмеженою довжиною гальмівного шляху електровоза, руху з постійною швидкістю та гальмування до повної зупинки, мікропереїздів на технологічні операції (заїзд на опрокид або під завантаження), а також руху пустого електровоза за допомогою математичного моделювання у середовищі Matlab. Циклограма руху та розподіл енергетичних потоків циклу та стан заряду суперконденсатора протягом циклу наведена на рис.3.15-3.17.

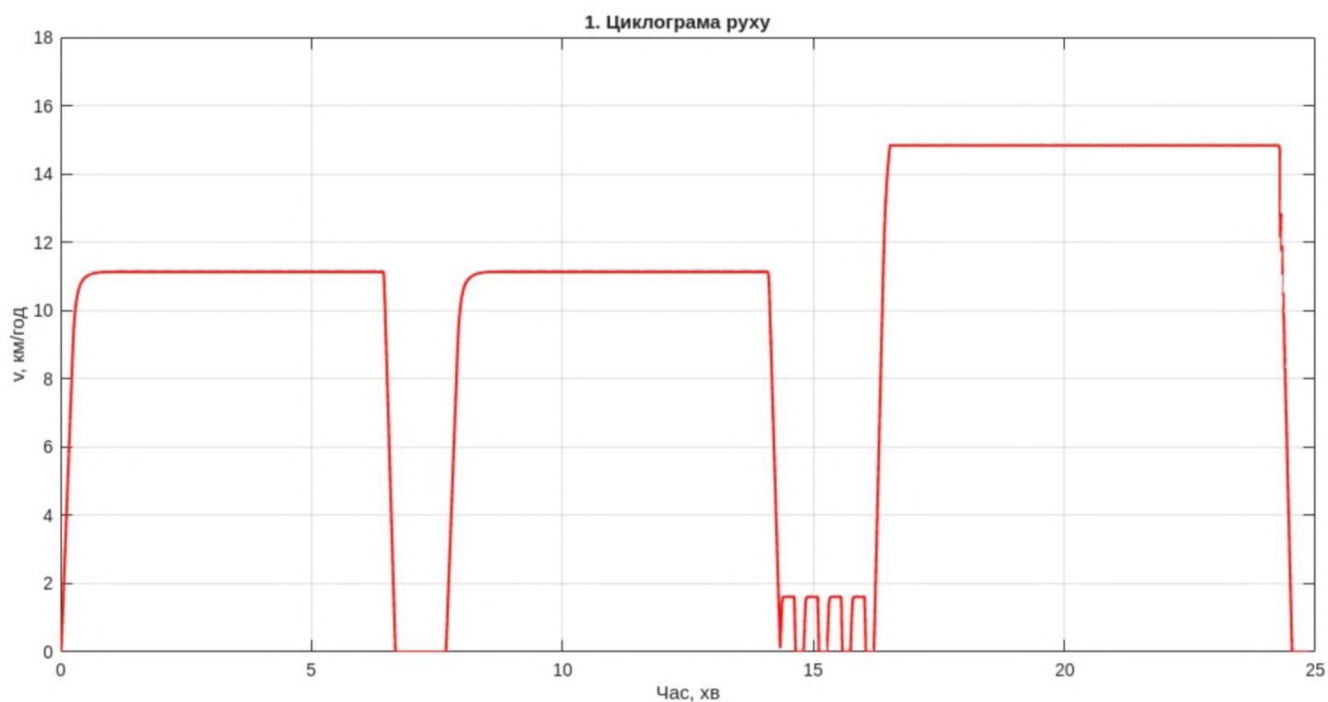


Рисунок 3.15 - Циклограма руху електровоза

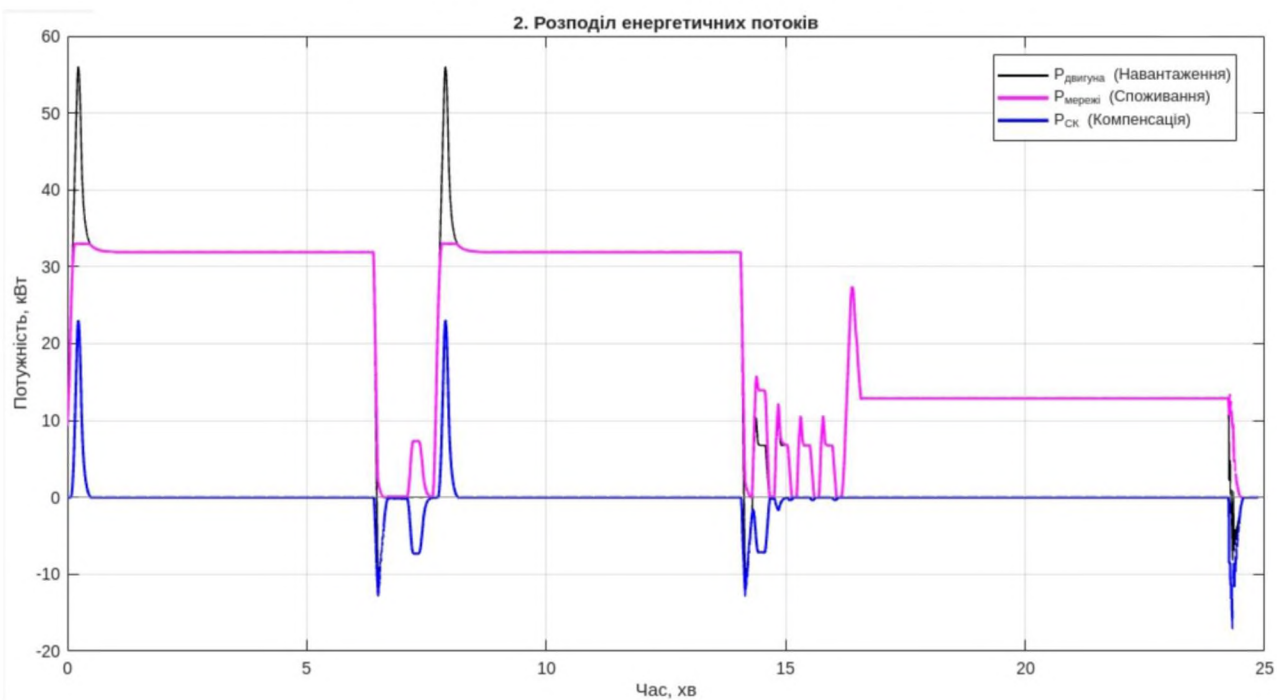


Рисунок 3.16 - Розподіл енергетичних потоків циклу

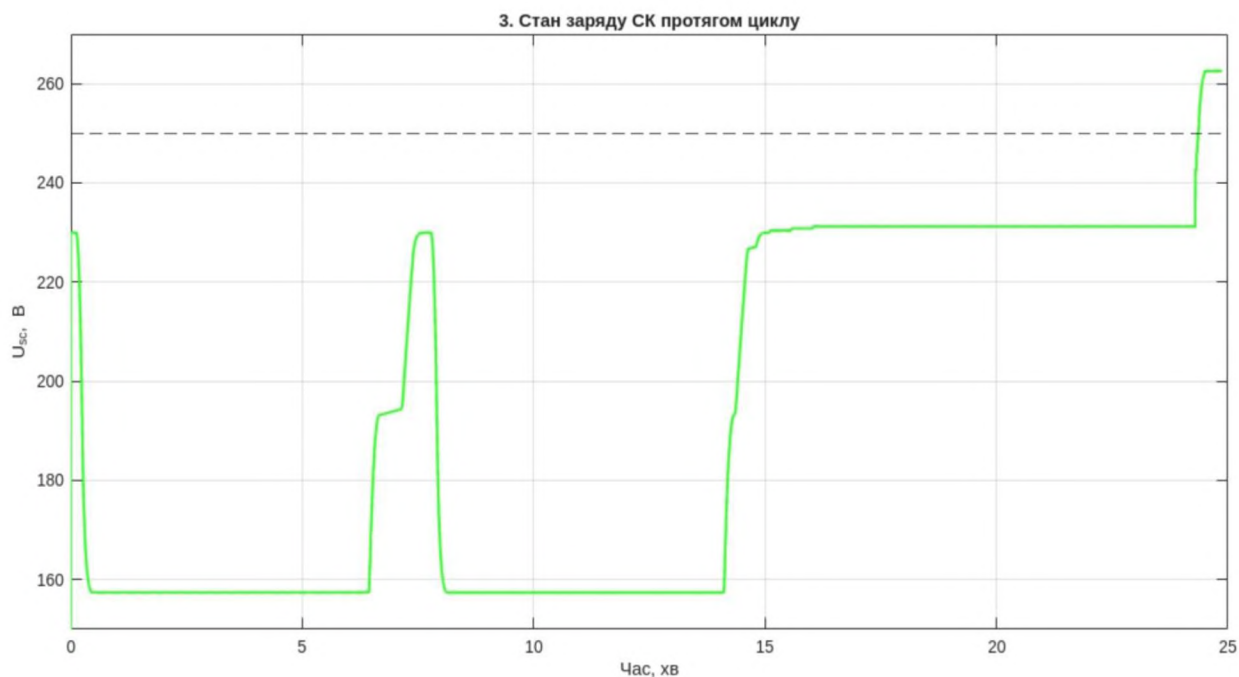


Рисунок 3.17 - Стан заряду суперконденсатора протягом циклу

Таблиця 3.1. - Таблиця енергетичних показників за цикл руху

Показник	РКСК (існуюча)	IGBT + SC (запропонована)	Ефект
Мінімальна напруга на струмоприймачі, В	194	220	Підвищення на 12%
Максимальний струм мережі, А	280	160	Зниження на 43%
Рекуперовано, кВт·год	-	0,292	-
Споживання енергії за цикл, кВт·год	20,986	17,646	Економія 15,9%

Результати математичного моделювання, зведені у табл.3.1 підтверджують, що впровадження системи накопичення енергії та імпульсного керування дозволяє вирішити проблему просідання напруги в шахтній мережі, зменшити пікові навантаження на 43% та забезпечити економію електроенергії близько 16% за рахунок виключення реостатних втрат та використання рекуперації.

3.4. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи

Метою даного підрозділу є визначення економічної доцільності модернізації електровоза К10 шляхом заміни реостатної системи керування на

імпульсну систему з накопичувачем енергії. Розрахунок базується на даних енергоспоживання, отриманих у ході математичного моделювання (п. 3.3).

1) Розрахунок річної економії електроенергії

Вихідні дані для розрахунку:

Споживання енергії за цикл (PKCK): $W_1 = 20,986 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Споживання енергії за цикл (IGBT+SC): $W_2 = 17,646 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Економія за один цикл: $\Delta W = 20,986 - 17,646 = 3,34 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Для розрахунку річного ефекту прийемо типовий графік роботи шахтного відкатного електровоза:

Тривалість одного рейсу (циклу): $t_{\text{ц}} \approx 23 \text{ хв}$ (включаючи навантаження/розвантаження).

Кількість рейсів за годину: $N = 1$.

Кількість робочих годин у зміні: $T_{\text{зм}} = 7 \text{ год}$.

Кількість змін на добу: $n_{\text{зм}} = 3$.

Кількість робочих днів на рік: $D_{\text{рік}} = 300$.

Кількість циклів за рік:

$$N_{\text{рік}} = NT_{\text{зм}} n_{\text{зм}} D_{\text{рік}} = 1 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 300 = 6300 \quad (3.1)$$

Річна економія електроенергії в натуральному виразі:

$$\Delta W_{\text{рік}} = N_{\text{рік}} \Delta W = 6300 \cdot 3,34 = 21042 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.2)$$

Річна економія в грошовому еквіваленті:

$$P_{\text{рік}} = \Delta W_{\text{рік}} P = 21042 \cdot 9,56 = 201161 \text{ грн} \quad (3.3)$$

Приймаємо середній тариф на електроенергію для промислових підприємств $P_{\text{ел}} \approx 9,56 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$.

2) Розрахунок капітальних витрат

Вартість модернізації складається з вартості комплектуючих та робіт із монтажу.

Таблиця 3.2. - Кошторис капітальних витрат на модернізацію одного електровоза

Найменування компонента	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
IGBT-модуль (Semikron SKM300GB066D)	6 шт.	10 000	60000
Суперконденсатор (3000F)	98 шт.	2500	245000
Драйвери керування та датчики	2 компл.	20000	40000
Мікроконтролерна система керування	1 шт	15000	15000
Силові шини, радіатори, корпус	2 компл.	15000	30000
Монтажні та налагоджувальні роботи	-	-	50000
ВСЬОГО			440000

Термін окупності проекту розраховується як відношення капітальних витрат до річного економічного ефекту:

$$T_{ок} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{рік}} = \frac{440000}{201161} = 2,19 \text{ років} \quad (3.4)$$

Тобто, проект повністю окупиться за 2 роки і 3 місяці.

Економічний розрахунок показує високу ефективність запропонованої модернізації. Термін окупності менше 2,5 років є привабливим показником для промислового обладнання.

ВИСНОВКИ

Загальною метою дипломного проекту було підвищення ефективності функціонування рейкового транспорту на базі електровозу К10.

Для цього у першому розділі роботи був виконаний аналіз системи електроприводу шахтного електровоза К10 та умов його експлуатації. Визначено, що штатна реостатно-контакторна система керування (РКСУ) має суттєві недоліки: значні втрати енергії в пускових резисторах (ККД пуску не перевищує 70%), неможливість корисного використання енергії гальмування та створення критичних пускових навантажень на контактну мережу, що призводить до глибокого просідання напруги. На основі аналізу запропоновано концепцію модернізації, яка полягає у переході на імпульсне керування (DC/DC перетворювач) з інтеграцією гібридного джерела живлення на базі суперконденсаторів для реалізації функції вирівнювання навантаження.

У другому розділі розроблено та теоретично обґрунтовано силову схему модернізованого електроприводу.

Запропоновано структуру силового перетворювача на базі 4 квадрантного DC-DC перетворювача з діодним випрямлячем у колі збудження, що дозволяє реалізувати безконтактний реверс та рекуперативне гальмування двигуна послідовного збудження. Розраховано параметри накопичувача енергії.

Синтезовано систему автоматичного керування з підпорядкованим регулюванням та розроблено алгоритм керування енергопотоками, який забезпечує обмеження струму мережі та автоматичний перерозподіл енергії між тяговим двигуном і накопичувачем.

У третьому розділі проведено математичне моделювання електроприводу.

Створено імітаційну модель існуючої системи РКСК в середовищі MATLAB/Simulink, дослідження якої підтвердило наявність значних пульсацій моменту та струму. Дослідження нової системи підтвердило ефективність запропонованих алгоритмів: забезпечено плавний розгін без ривків, стабілізацію напруги на струмоприймачі на рівні 220 В та обмеження споживання струму з мережі на рівні 160 А.

Доведено, що впровадження системи дозволяє реалізувати рекуперативне гальмування, що разом із виключенням реостатних втрат забезпечує зниження споживання електроенергії за цикл руху на 15.9%.

Оцінка економічної ефективності показала доцільність запропонованої модернізації. Завдяки економії електроенергії, розрахунковий термін окупності проекту становить близько 2,5 років.

Таким чином, розроблена система керування дозволяє вирішити проблему протяжних шахтних мереж, підвищити продуктивність відкатки за рахунок покращення динаміки та суттєво зменшити експлуатаційні витрати гірничодобувного підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Синчук О.Н. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование: ученик / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый: под. ред.. доктора технических наук, профессора О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А.В., 2015 – 428 с.
2. Волотковский С. А. Рудничная электровозная тяга : учебник для вузов / С. А. Волотковский. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1981. — 389 с.
3. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
4. Осадчук Ю.Г. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г. Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О. Кальмус; за редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука - Варшава: iScience Sp. z.o.o - 2024 - 162 с.
5. Xiao Y. Regenerative Braking of Series-Wound Brushed DC Electric Motors for Electric Vehicles / Y. Xiao, M. Nemec, L. J. Borle // 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). — Singapore, 2012. — P. 1657–1662. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360993.
6. Kumar L. Performance Analysis of Chopper Fed DC Series Motor for Traction Applications / L. Kumar, S. Jain // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. — 2014. — Vol. 4, No. 3. — P. 325–334.
7. MaxwellTechnologies. DuraBlue™ SupercapacitorModules : Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.maxwell.com>.
8. M. H. Rashid, E. David, and Suleman Aslam, “Power Electronics Handbook" by,” 2023, Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26720.25606>
9. Nikitenko, Anatolii. (2018). Electromagnetic processes of charging of on-board supercapacitor storage system during the regenerative braking mode of DC electric rolling stock with series-wound DC motors. MATEC Web of Conferences. 180. 02007.10.1051/matecconf/201818002007.

10. Plotnikov, Iurii & Savosina, Alena & Vladimir, Polyakov. (2023). The Choosing of Supercapacitor Capacitance for Smoothing the Peak Loads in the Frequency-Controlled Tram Electric Drive. 1-6. 10.1109/ACED57798.2023.10143474.
9. P. Iurii and P. Vladimir, "Estimation of Technical and Economic Efficiency of Using the Supercapacitors in a Frequency-Controlled Crane Electric Drive with a Common DC Link," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249297.
11. Zhu, Longji & Wang, Xinrui. (2020). Hybrid energy storage system of storage battery / super capacitor for mine electric locomotive. Journal of Physics: Conference Series. 1633. 012081.10.1088/1742-6596/1633/1/012081.
12. Chao, Xiao. Fundamental of Power Electronics. <https://doi.org/10.1007/978-0-306-48048-5>