

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з
вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя**

Виконав: студент групи ЕЕМ-22-1

Іван ЄЛІЗАРОВСЬКИЙ

Керівник випускної роботи _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЄЛІЗАРОВСЬКИЙ Іван Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Умови роботи тягових двигунів шахтного електровоза що впливають на вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя; II. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя; III. Вибір оптимальних конструктивних параметрів згладжуючого дроселя.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Живлення двигуна на електровозі змінного струму; II. Залежність потужності, що споживається двигуном, від тривалості ввімкнення; III. Розрахунок згладжуючого дроселя; IV. Відносна величина мінімальної ваги дроселя.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика обладнання шахтного електровоза	24.05.26
2	Специфіка дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза	27.05.26
3	Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза	02.06.26
4	Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза при пульсуючому струмі	07.06.26
5	Вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя для режимів роботи тягових двигунів	11.06.26
6	Оптимальність розмірів згладжуючого дроселя	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Іван ЄЛІЗАРОВСЬКИЙ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя»

40 с., 5 рис., 15 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення енергетичної ефективності, надійності та довговічності тягових електродвигунів шахтних локомотивів шляхом оптимізації масо-габаритних та електромагнітних параметрів згладжуючого дроселя в системі імпульсного регулювання напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз динамічних режимів роботи тягових двигунів (переважно постійного струму послідовного збудження) в умовах частих пусків, гальмувань та змінних навантажень, характерних для рудникового транспорту.

Дослідити вплив пульсацій струму та напруги, що генеруються напівпровідниковими широтно-імпульсними перетворювачами, на тепловий стан, втрати енергії та умови комутації тягового електродвигуна.

Розробити математичну модель силового кола «джерело живлення – імпульсний перетворювач – згладжуючий дросель – тяговий двигун» для імітаційного моделювання перехідних процесів.

Сформулювати багатокритеріальну цільову функцію для оптимізації параметрів згладжуючого дроселя, яка б враховувала мінімізацію його маси та габаритів за умови забезпечення допустимого коефіцієнта пульсацій струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Розрахувати та обґрунтувати оптимальну індуктивність та конструктивні параметри дроселя для конкретних типів шахтних електровозів (наприклад, контактних чи акумуляторних).

ШАХТНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН,
ЗГЛАДЖУЮЧИЙ ДРОСЕЛЬ, ПУЛЬСАЦІЇ СТРУМУ, ШИРОТНО-
ІМПУЛЬСНЕ РЕГУЛЮВАННЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Умови роботи тягових двигунів шахтного електровоза що впливають на вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя.....	13
1.1. Характеристика обладнання шахтного електровоза для вибору оптимальних параметрів згладжуючого дроселя	13
1.2. Специфіка дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза для вибору оптимальних параметрів згладжуючого дроселя .	18
Розділ 2. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя.....	19
2.1. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза	19
2.2. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза при пульсуючому струмі	22
2.3. Вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя для режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза.....	25
Розділ 3. Вибір оптимальних конструктивних параметрів згладжуючого дроселя.....	28
3.1. Оптимальність розмірів згладжуючого дроселя виходячи з умови мінімальності об'єму і ваги активних матеріалів.....	28
3.2. Аналіз отриманих розрахункових даних щодо оптимальності розмірів згладжуючого дроселя виходячи з умови мінімальності об'єму і ваги активних матеріалів	34
Висновки	37
Список використаних джерел	38

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Еволюція систем керування тяговими приводами рудникових електровозів

Ефективне функціонування підземного залізничного транспорту є однією з найважливіших умов ритмічної роботи гірничодобувних підприємств.

Історично на переважній більшості вітчизняних шахтних електровозів (як контактних, так і акумуляторних) застосовувалася реостатно-контакторна система керування (РКСК) тяговими двигунами постійного струму.

Незважаючи на свою простоту, РКСК має критичний недолік — величезні втрати електроенергії (до 30%) на пускових і гальмівних резисторах, а також ступінчастість регулювання тягового зусилля, що призводить до динамічних ударів у трансмісії та зчіпках вагонів.

Перехід до сучасних енергоощадних технологій зумовив широке впровадження тиристорних, а згодом і транзисторних (на базі IGBT-модулів) систем широтно-імпульсного регулювання (ШІР).

Використання напівпровідникових перетворювачів дозволило забезпечити плавне безступеневе регулювання швидкості, ліквідувати втрати енергії в реостатах та реалізувати ефективне рекуперативне гальмування.

Проте впровадження імпульсних систем керування породило нову науково-технічну проблему, пов'язану з електромагнітною сумісністю силового перетворювача та колекторного тягового двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблема пульсацій струму в тягових електродвигунах

Специфіка роботи широтно-імпульсного перетворювача полягає в тому, що напруга на тяговий двигун подається не безперервно, а у вигляді прямокутних імпульсів високої частоти.

Через це струм у якорі двигуна набуває яскраво вираженого пульсуючого характеру.

Наявність змінної складової струму (пульсацій) вкрай негативно позначається на роботі двигунів постійного струму, які спочатку проєктувалися для живлення від джерел із постійною напругою (наприклад, від акумуляторної батареї чи генератора).

Пульсації струму викликають низку деградаційних процесів в електромеханічній системі:

1. Погіршення умов комутації.

Змінна складова магнітного потоку наводить додаткову реактивну ЕРС у комутованих секціях обмотки якоря, що призводить до сильного іскріння на колекторі (кругового вогню), прискореного зносу щіток та підгоряння колекторних пластин.

2. Зростання теплових втрат.

Змінна складова струму зумовлює появу вихрових струмів та гістерезису в масивних частинах магнітопроводу двигуна (станині, головних та додаткових полюсах), що призводить до додаткового нагрівання машини. Це вимагає зниження номінального навантаження на двигун або посилення системи його охолодження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Зниження загального ККД.

Енергія пульсацій не бере участі у створенні корисного електромагнітного моменту, а повністю розсіюється у вигляді тепла та електромагнітних завад.

Роль та значення згладжуючого дроселя

Для обмеження амплітуди пульсацій струму до безпечного рівня (зазвичай не більше 5–10% від номінального значення) у силове коло між імпульсним перетворювачем та тяговим двигуном послідовно вмикають індуктивно-ємнісні фільтри, основним елементом яких є згладжуючий дросель (реактор).

Його індуктивність згладжує криву струму, приймаючи на себе основну частину пульсацій напруги.

Здавалося б, найпростішим рішенням є встановлення дроселя з максимально великою індуктивністю.

Проте в умовах підземного транспорту такий підхід є абсолютно неприйнятним.

Збільшення індуктивності дроселя прямо пропорційно призводить до збільшення його маси, габаритів та вартості активних матеріалів (міді та електротехнічної сталі).

Жорсткі обмеження рудникового транспорту

Шахтний електровоз має вкрай обмежений внутрішній простір через вимоги до мінімізації його габаритів (для можливості пересування у вузьких гірничих виробках).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, надмірно масивний дросель збільшує непоресорену або загальну масу електровоза, змінюючи його динамічні характеристики.

Також варто враховувати, що велика індуктивність у силовому колі уповільнює швидкість наростання струму, що може погіршити динаміку розгону локомотива та знизити швидкодію систем захисту від струмів короткого замикання.

Наукова задача оптимізації

З огляду на зазначені суперечності, вибір параметрів згладжуючого дроселя перетворюється на складну задачу багатокритеріальної оптимізації.

Необхідно знайти такий компроміс, за якого індуктивність дроселя буде мінімально необхідною для забезпечення безіскрової комутації та допустимого теплового стану тягового двигуна, і водночас масо-габаритні показники фільтра будуть прийнятними для розміщення в кузові рудникового локомотива.

Окрему складність становить той факт, що параметри двигуна та самого дроселя не є сталими. Індуктивність обмоток змінюється залежно від ступеня насичення магнітопроводів при різних струмах навантаження (при рушанні поїзда струми можуть перевищувати номінальні у 2-2.5 рази).

Практичне значення дослідження

Таким чином, комплексне дослідження режимів роботи тягових двигунів спільно з імпульсними перетворювачами та розробка методики вибору оптимальних параметрів згладжуючого дроселя є надзвичайно актуальною задачею.

Її вирішення дозволить підвищити експлуатаційну надійність наявного парку тягових електродвигунів шахтних локомотивів, збільшити міжремонтні інтервали (за рахунок зменшення зносу колекторно-щіткового

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

вузла) та оптимізувати компонування силового електрообладнання під час модернізації чи проєктування нових серій рудникових електровозів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Умови роботи тягових двигунів шахтного електровоза що впливають на вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя

1.1. Характеристика обладнання шахтного електровоза для вибору оптимальних параметрів згладжуючого дроселя

На основі серійного рудникового електровоза типу 14КР з використанням його механічної частини, тягових двигунів постійного струму, двигуна компресора побудований та випробуваний в шахтних умовах електровоз змінного струму (рис. 1-1).

На відміну від електровозів постійного струму на ньому встановлено мостовий тиристорний перетворювач, що дозволяє плавно регулювати випрямлену напругу на тягових двигунах у тяговому та гальмівному режимах (рис. 1-2).

Пускові опори та контролер були вилучені; у силове коло додані контактори для реверсування тягових двигунів, гальмівний опір та згладжуючий дросель (рис. 1-3; 1-4).

Для захисту нових вузлів обладнання на електровозі використана система захисту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив	Єлізаровський				Розділ 1				Літ.	Лист	Листів	
Перевірив	Сінчук О.М.										13	6
Реценз.												
Н. Контр.	Сінчук О.М.											
Затвердив	Пересунько І.І.											
					КНУ ЕЕМ-22-1							

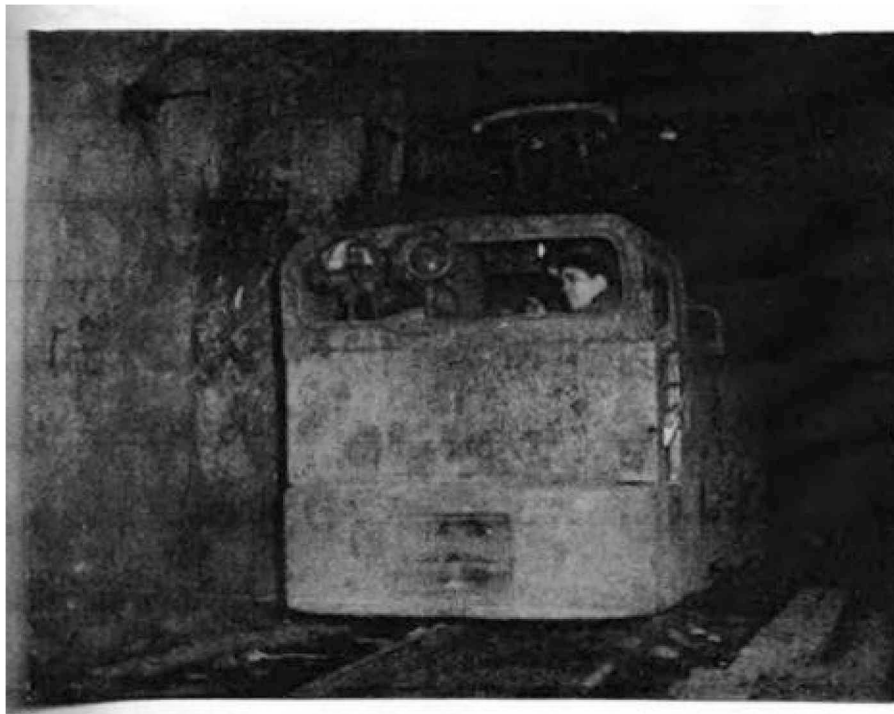


Рис. 1-1. Загальний вигляд рудничного електровозу з тиристорним перетворювачем.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1-2. Шафа керування в кабіні машиніста електровозу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

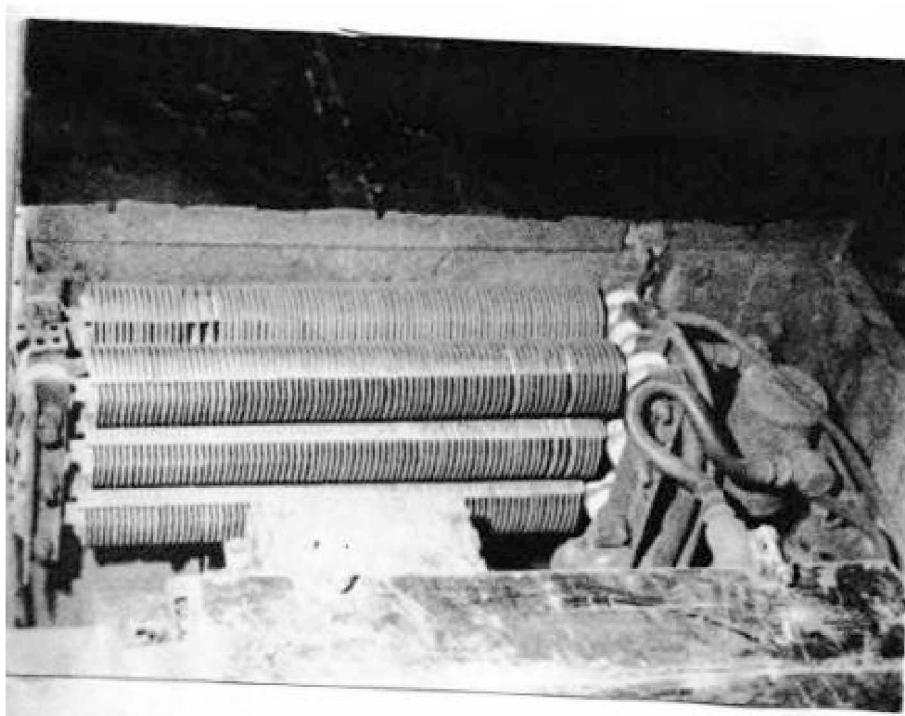


Рис. 1-3. Тормозні опори в кузові електровозу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

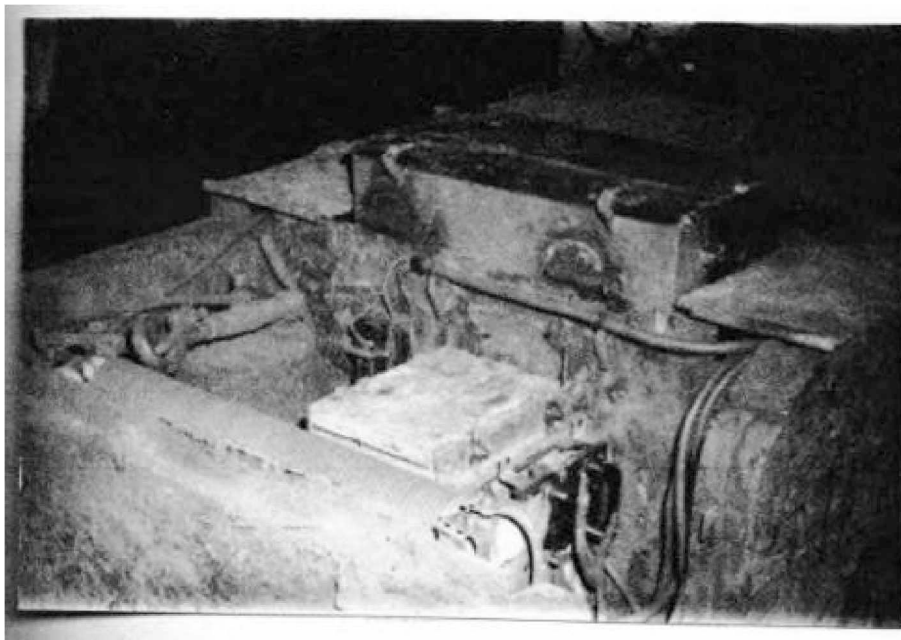


Рис. 1-4. Установка згладжуючого дроселя та контакт орного ящика.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Специфіка дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза для вибору оптимальних параметрів згладжуючого дроселя

При дослідженні режимів роботи рудникового електровоза змінного струму в шахтних умовах основна увага приділялась суттєво новим вузлам.

До них необхідно віднести: блок управління та захисту, силовий тиристорний перетворювач, згладжуючий дросель.

Метою випробувань було:

визначити працездатність розробленої апаратури в шахтних умовах, перевірити тепловий режим тиристорного блоку при різних режимах роботи.

Як показали випробування, при імпульсній системі управління значно використовується зчіпна вага електровоза.

Управління системою викликає добрі суб'єктивні відчуття.

Це пояснюється плавним розгоном електровоза.

Керовані випрямлячі та тиристори в процесі випробувань працювали стійко.

Тепловий режим вентилів був у межах норми.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Розділ 2. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза з вибором оптимальних параметрів згладжуючого дроселя

2.1. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза

У роботі [6] вказувалося на вигідне використання як тягового привода двигуна послідовного збудження, що застосовується на серійних електровозах постійного струму.

Живлення двигуна на електровозі змінного струму передбачається за однонапівперіодною схемою випрямлення.

Використання двох рівнів напруги в контактній мережі $U_{c\sim} = 660 \text{ В}$ і $U_{c\sim} = 380 \text{ В}$, головним чином, впливатиме на продуктивність привода тягового двигуна.

В однонапівперіодній схемі випрямлення середнє значення випрямленої напруги дорівнює:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{c\sim},$$

при $U_{c\sim} = 660 \text{ В}$: $U_{d\max} = 297 \text{ В}$;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2			Лім.	Лист	Листів	
Розробив	Єлізаровський										
Перевірів	Сінчук О.М.									19	9
Реценз.								КНУ ЕЕМ-22-1			
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

$$U_{c\sim} = 380 \text{ В}; \quad U_{d\min} = 171 \text{ В};$$

в відносних одиницях по відношенню до номінальної напруги двигуна $U_{ндв} = 220 \text{ В}$ відповідно складає:

$$1.35 \text{ і } 0,78.$$

(згідно з [6]), за тривалу найбільшу напругу $U_{d\max} = 264 \text{ В}$.

Зниження напруги від номінального значення на двигуні призводить до зменшення потужності та швидкості двигуна, до збільшення тривалості роботи машини.

Такий режим роботи тягового двигуна викликає підвищений нагрів обмоток двигуна і знижує коефіцієнт використання його за потужністю.

На рис. 2-1 представлені залежності потужності двигуна ДП-12 від тривалості його ввімкнення при напругах: $U_{c\sim} = 264 \text{ В}; 250 \text{ В}; 154 \text{ В і } 220 \text{ В}$.

Криві побудовані з урахуванням постійних втрат двигуна і погіршених умов його охолодження при живленні постійною напругою.

В реальних умовах (при $U_{c\sim} = 250 \text{ В}$, справній пневмосистемі) тривалість ввімкнення привода компресора не перевищує 30 сек. (двигун розрахований на ПВ = 25%).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, при такій напрузі в контактній мережі двигун має значний запас потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Дослідження режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза при пульсуючому струмі

Робота машини при пульсуючому струмі відрізняється за нагріванням від роботи на постійному струмі тим, що змінюються величини постійних втрат і з'являються нові втрати.

З цієї причини теплове перевантаження двигуна буде тим вищим, чим більше відношення тривалості циклу до постійної нагрівання машини.

Згідно зі СТАНДАРТОМ при 10% обмеженні теплового перевантаження, відношення тривалості циклу до постійної нагрівання $\left(\frac{t_{\text{ц}}}{\theta}\right)$ не повинно перевищувати 0,2.

Постійна часу нагрівання двигунів краново-металургійного типу серії ДП постійного струму не перевищує однієї години.

Тривалість циклу роботи тягового двигуна не перевищує 10 хв.

Тоді відношення $\frac{t_{\text{ц}}}{\theta} = \frac{10}{60} = 0,16 < 0,2$ задовольняє прийнятому обмеженню і робота тягового двигуна на тривало понижений напрузі можлива.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

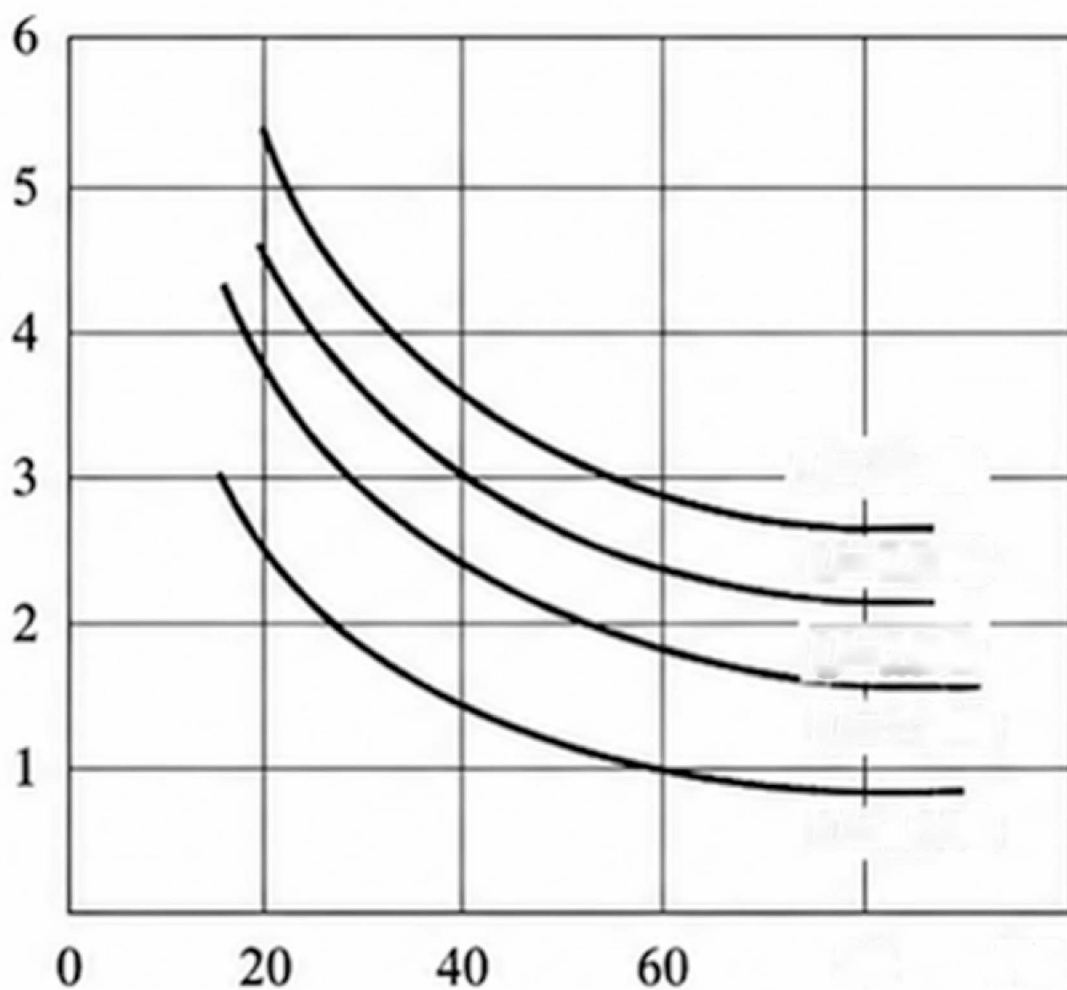


Рис. 2-1. Залежність потужності, що споживається двигуном ДП-I2, від тривалості ввімкнення.

Таким чином, при тривало мінімальній напрузі $U_{\text{dmin}} = 154 \text{ В}$, зменшення швидкості двигуна по відношенню до номінальної з одного боку підвищує комутаційну міцність машини, з іншого боку збільшуються втрати, як постійні, так і змінні від пульсуючих магнітних полів, зменшують використання двигуна за потужністю (ПВ дійсн. > ПВ кат. = 25%).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Вибір оптимальних параметрів згладжуючого дроселя для режимів роботи тягових двигунів шахтного електровоза

Величина коефіцієнта пульсації струму якоря при такому режимі роботи привода електровоза обмежується допустимим нагріванням обмоток машини.

Виходячи з реально існуючих пульсацій у допоміжних машинах промислових електровозів змінного струму (50–60%) [7], коефіцієнт пульсації приймаємо при тривалій мінімальній напрузі рівним 0,4.

Тоді необхідна індуктивність згладжуючого пристрою:

$$L = \frac{U_{m1}}{I_{m1} \cdot \omega} = \frac{256}{8 \cdot 314} = 0,102 \text{ Гн},$$

$$\text{де } U_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin^2 \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{c2} = 256 \text{ В},$$

з урахуванням втрат напруги в контактній мережі 5%: $U_{c2} = 380 - 380 \cdot 0,05 = 361 \text{ В};$

$$I_{m1} = I_d \cdot k_{п.я} = 19 \cdot 0,4 \approx 8 \text{ А}; \quad \omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Потужність дросельна дорівнює:

$$S = I_p \cdot \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} = 20 \cdot 181 = 3,62 \text{ кВА},$$

$$\text{де } I_p = \sqrt{I_d^2 + \frac{1}{2} I_{m1}^2} = \sqrt{19^2 + \frac{64}{2}} = 19,9 \approx 20 \text{ А}.$$

Максимальна напруга на колекторі двигуна електровоза виникає при тривалій найбільшій напрузі.

При такому режимі роботи значно погіршується комутаційна стійкість машини і при значному зростанні швидкості може призвести до утворення аварійного режиму — кругового вогню.

Отже, в цьому випадку визначальною при виборі коефіцієнта пульсації струму є величина, що забезпечує достатню комутаційну міцність двигуна.

Враховуючи те, що дія тривалої найбільшої напруги на двигун у часі буде значно меншою ($P_B < 25\%$) і з урахуванням індуктивності двигуна коефіцієнт пульсації струму якоря може бути прийнятий рівним $k_{п.я} = 0,5$.

Амплітудне значення основної гармоніки струму дорівнює:

$$I_{m1} = I_d \cdot k_{п.я} = 19 \cdot 0,5 = 9,5 \text{ А}.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді індуктивність дроселя дорівнює:

$$L = \frac{U_{m1}}{I_{m1} \cdot \omega} = \frac{440}{9,5 \cdot 314} = 0,147 \text{ Гн},$$

$$\text{де } U_{m1} = \frac{U_m}{2} = \frac{\sqrt{2}(U_c - \Delta U)}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} (660 - 33) = 440 \text{ В},$$

$\Delta U = 5\% U_{c1}$ — втрати напруги в контактній мережі.

Необхідна потужність згладжуючого пристрою:

$$S = I_p \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} = 20,1 \cdot 311 = 6,26 \text{ кВА},$$

$$\text{при } I_p = \sqrt{I_d^2 + \frac{1}{2} I_{m1}^2} = 20,1 \text{ А}.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Вибір оптимальних конструктивних параметрів згладжуючого дроселя

3.1. Оптимальність розмірів згладжуючого дроселя виходячи з умови мінімальності об'єму і ваги активних матеріалів

Оптимальність розмірів згладжуючого пристрою будемо шукати, виходячи з умови мінімальності об'єму і ваги активних матеріалів.

Конструкція магнітопроводу пристрою приймається двострижневою з двома обмотками.

Розміщення дроселя передбачається в кабіні машиніста.

Відомо, що геометрія пристрою повністю характеризується безрозмірними параметрами [6,8] :

$$x = \frac{b}{a}; \quad y = \frac{c}{a}; \quad z = \frac{h}{a};$$

де a — ширина стрижня осердя, прийнята за базову,

b — товщина стрижня осердя,

c — ширина вікна,

h — висота обмотки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Єлізаровський				Розділ 3	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук О.М.						28	9
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-22-1		

Загальний об'єм і вага дроселя дорівнює:

$$V_{\text{др}} = 2[x(y + z + 2) + yz(x + y + 1)] \cdot a^3, \text{ см}^3,$$

$$G_{\text{др}} = (K_z \gamma_c V_c + K_m \gamma_m V_m) = 2[x(y + z + 2)K_z \gamma_c + yz(x + y + 1)K_m \gamma_m] \cdot a^3, \text{ кг}.$$

Розрахунок параметрів дроселя проведено для тривалої найбільшої напруги, оскільки індуктивність його незначно відрізняється від індуктивності при тривалій найменшій напрузі.

Нормальна робота пристрою забезпечується при дії індукції максимальної B_s , прийнятої на вигині кривої намагнічування (для сталі 3330 $B_s = 1,1 \text{ Тл}$ при $H_s = 25 \text{ А/м}$).

Так як двигун працює в повторно-короткочасному режимі, щільність струму в обмотці дроселя може бути прийнята більшою, ніж у сухих трансформаторах при роботі в тривалому режимі.

Приймаємо граничну величину щільності струму $j = 8 \text{ А/мм}^2$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Тоді переріз провoda дорівнює:

$$q = \frac{I_p}{j} = \frac{20,1}{8} = 2,5 \text{ мм}^2.$$

Проведемо вибір оптимальної ваги дроселя за методикою [9].

Добуток числа витків на переріз сталі дорівнює:

$$Q = w \cdot S_{\text{ст}} = \frac{L \cdot I_{\text{мп}}}{B_s} = \frac{0,147 \cdot 28,5}{1,1} = 3,8 \text{ м}^2 = 3,8 \cdot 10^4 \text{ см}^2,$$

де $B_s = B_d + B_{\sim} = 1,1 \text{ Тл}$,

$$I_{\text{мп}} = I_d + I_{m_1} = 19 + 9,5 = 28,5 \text{ А}.$$

Величину параметра (n) визначаємо за формулою:

$$n = \sqrt{\frac{Q \cdot I_{\text{мп}}}{j \cdot K_c \cdot K_m}} = \sqrt{\frac{Q \cdot q}{K_c \cdot K_m}} = \sqrt{\frac{3,8 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{0,27}} = 59,2 \text{ см}^2,$$

де $K_c = 0,9$ — коефіцієнт заповнення сталі стрижня,

$K_m = 0,3$ — коефіцієнт shadow-заповнення по міді.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Тоді $\sqrt{n} = 7,68 \text{ см}; \quad n\sqrt{n} = 454 \text{ см}^3$.

При відповідних комбінаціях відносних величин дроселя x та z відносна величина мінімальності ваги дроселя приймає значення, які наведені в таблиці 3-1.

x	1	1	1	2	2	2	3	3	3
z	I	2	3	1	2	3	1	2	3
$p_{\min} \cdot 10^{-3}$	60,8	57,6	57,2	58,1	58,8	55,8	57,9	55,4	55,7
β	0,74	0,69	0,67	0,55	0,52	0,55	0,46	0,43	0,4

де β — нова змінна величина, що не залежить від $p_{\min}$;

$p_{\min}$ — відносна величина мінімальності ваги дроселя.

Тоді параметри дроселя, що відповідають мінімальній вазі, визначаються:

- ширина стрижня — $a = \beta \sqrt{n}$, см;
- мінімальна вага — $G_{др} = p \cdot n \sqrt{n}$, кг;
- ширина вікна — $c = \frac{n}{a \sqrt{x \cdot z}}$, см ;
- висота обмотки — $h = z \cdot c$, см;
- повітряний зазор — $\delta = \left(\frac{I_{mp} \cdot w}{B_s} - \frac{H_s}{B_s} l_\mu \right) \mu_0$, м ;

де $l_\mu = 2c(z + 1) + 4a$, см

кількість витків дроселя $w = \frac{z \cdot K_m \cdot c^2}{q}$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Розрахунок зведено в таблицю 3-2.

x	I	I	I	2	2	2	3	3	3
z	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$p_{\min} \cdot 10^{-3}$	60,8	57,6	57,2	58,1	58,8	55,8	57,9	55,4	55,7
β	0,74	0,69	0,67	0,55	0,52	0,5	0,46	0,43	0,4
a,см	5,68	5,3	5,14	4,22	4,0	3,84	3,53	3,3	3,07
$G_{\text{др}}, \text{кг}$	28,6	26,2	26	26,3	26,7	25,4	26,2	25,2	25,2
c,см	10,4	8,05	6,65	9,93	7,4	6,3	9,7	7,32	6,45
h,см	10,4	16,1	19,95	9,93	14,8	18,9	9,7	14,64	19,35
b,см	5,68	5,3	5,14	8,44	8,0	7,68	10,59	9,9	9,21
w	1300	1370	1590	1180	1310	1430	1130	1250	1500
$l_{\mu}, \text{см}$	64,32	69,5	73,76	56,6	60,4	65,76	52,92	57,12	63,88
$\delta, \text{см}$	4,2	5,1	5,18	3,84	4,26	4,6	3,68	4,16	4,87
y	1,8	1,6	1,3	2,4	1,85	1,65	2,8	2,2	2,1

3.2. Аналіз отриманих розрахункових даних щодо оптимальності розмірів згладжуючого дроселя виходячи з умови мінімальності об'єму і ваги активних матеріалів

Аналіз отриманих розрахункових даних показує, що мінімальній вазі дроселя відповідають величини безрозмірних параметрів $x = 3$; $y = 2$; $z = 3$.

Визначення мінімального об'єму згладжуючого пристрою проводимо за табл. 3.І [6].

Як видно з таблиці, мінімальність об'єму також може бути забезпечена при відповідних величинах $x = 3$, $y = 2$, $z = 3$.

В цьому випадку відзначається рівномірний розподіл об'єму між обмоткою і сталлю дроселя $\frac{V_K}{V_{ЭМ}} = 15,6$, $\frac{V_{ст}}{V_{ЭМ}} = 11,6$.

Надалі для розрахунків параметрів пристрою прийняті такі розміри:

$$a = 4 \text{ см}, b = 10 \text{ см}, c = 8 \text{ см}, h = 15 \text{ см}, \delta_3 = 4 \text{ см}.$$

Кількість витків, що забезпечують нормальний режим роботи дроселя, приймаємо рівною 1200.

Для намотування котушок прийнято круглий провід марки ПБ з посиленою ізоляцією ($2\delta_{из} = 0,9 \text{ мм}$), перерізом $2,57 \text{ мм}^2$ (діаметр провора рівний $1,81 \text{ мм}$).

Тоді дійсна щільність струму дорівнює:

$$j = \frac{I_p}{q} = \frac{20,1}{2,57} = 7,8 \text{ А/мм}^2.$$

З урахуванням того, що провід прийнято з посиленою ізоляцією і перерізом більше розрахункового, ширина вікна магнітопроводу повинна бути рівною 10 см.

Нижче в таблиці 3-3 наведені остаточні результати розрахунку параметрів дроселя за методикою, наведеною в [6].

w1 на стерж.	n1 шарів	Δ,см рад. товщ.	l_{ср} ,см	V_{ст} ,см³	G_{ст} ,кг	G_{об} ,кг	G_{др} ,кг	гдр,ом	Рэл ,Вт	Вδ ,Тл
50	12	4,25	49,3	2640	20,2	26,6	46,8	0,0514	185	1,05

Вага дроселя з урахуванням кріпильного матеріалу та ізоляції дорівнює:

$$G_{\text{др}} = I, I (G_{\text{об}} + G_{\text{ст}}) = I, I 46,8 = 51,5 \text{ кг.}$$

Габаритні розміри в см:

a	b	c	Нобм	Ндр	Ширина дроселя	Довжина дроселя	δ	Vдр,см3
4	10	10	15	25	19	27	4	12840

Конструкція згладжуючого пристрою наведена на рис. 1.14 [6]. Місце розташування дроселя — під шафою управління в кабіні машиніста.

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Провести аналіз динамічних режимів роботи тягових двигунів (переважно постійного струму послідовного збудження) в умовах частих пусків, гальмувань та змінних навантажень, характерних для рудникового транспорту.

Дослідити вплив пульсацій струму та напруги, що генеруються напівпровідниковими широтно-імпульсними перетворювачами, на тепловий стан, втрати енергії та умови комутації тягового електродвигуна.

Розробити математичну модель силового кола «джерело живлення – імпульсний перетворювач – згладжуючий дросель – тяговий двигун» для імітаційного моделювання перехідних процесів.

Сформулювати багатокритеріальну цільову функцію для оптимізації параметрів згладжуючого дроселя, яка б враховувала мінімізацію його маси та габаритів за умови забезпечення допустимого коефіцієнта пульсацій струму.

Розрахувати та обґрунтувати оптимальну індуктивність та конструктивні параметри дроселя для конкретних типів шахтних електровозів (наприклад, контактних чи акумуляторних).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Список використаних джерел

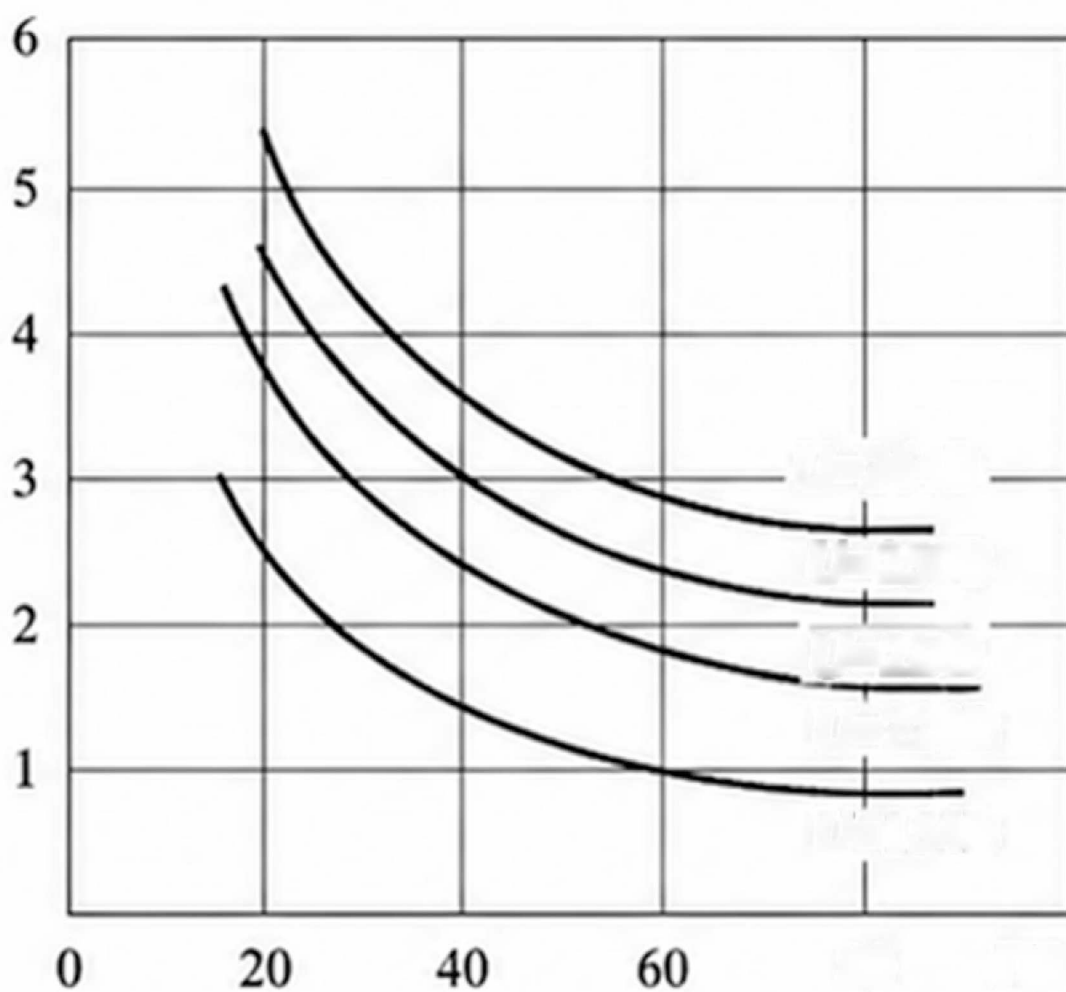
1. Rashid, M. H. (2014). Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications (4th ed.). Pearson.
2. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
3. Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). Fundamentals of Power Electronics (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
4. Hughes, A., & Drury, B. (2013). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications (4th ed.). Newnes.
5. Sen, P. C. (2013). Principles of Electric Machines and Power Electronics (3rd ed.). John Wiley & Sons.
6. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrierlag.
7. Kießling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2001). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Publicis Corporate Publishing.
8. Alonso, J. M., Ribas, J., Del Coz, J. J., Calleja, A. J., Corominas, E. L., & Rico-Secades, M. (2004). Development of a mathematical model for a high-frequency inductor and its application to optimization. IEEE Transactions on Power Electronics, 19(2), 261-269.
9. Gieras, J. F. (2008). Advancements in Electric Machines. Springer.
10. Hillmansen, S., & Roberts, C. (2007). Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221(1), 135-143.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., & Jiang, L. (2017). Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. Chinese Journal of Electrical Engineering, 3(3), 1-17.
12. Petruzella, F. D. (2010). Electric Motors and Control Systems. McGraw-Hill Education.
13. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (Eds.). (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.
14. McLyman, C. W. T. (2004). Transformer and Inductor Design Handbook (3rd ed.). CRC Press.
15. Ogasa, M. (2010). Application of energy storage technologies for electric railway vehicles—Examples with light rail vehicles. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(3), 304-311.

Додаток А

Залежність потужності, що споживається двигуном ДП-І2, від тривалості ввімкнення.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-07

Арк.

40