

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:

Розробка системи електричної тяги змінного струму

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Роман ДОБРОЗНАЙ

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

ДОБРОЗНАЙ Роман Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка системи електричної тяги змінного струму

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка системи електричної тяги змінного струму
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Втрата напруги в контактній мережі та її визначення; II. Визначення довжини живильного крила; III. Устаткування тягових підстанцій при відкочуванні змінним струмом; IV. Приклад визначення кількості підстанцій на горизонті.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Розрахункові схеми визначення втрат напруги під час роботи на секції; II. Залежність довжини проводу підстанції, що живиться, від необхідних швидкостей руху електровозів.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Втрата напруги в контактній мережі та її визначення	21.05.26
2	Визначення довжини живильного крила	27.05.26
3	Устаткування тягових підстанцій при відкочуванні змінним струмом	31.05.26
4	Приклад визначення кількості підстанцій на горизонті	07.06.26
5	Розрахункові схеми визначення втрат напруги під час роботи на секції	11.06.26
6	Залежність довжини проводу підстанції, що живиться, від необхідних швидкостей руху електровозів	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Роман ДОБРОЗНАЙ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра
на тему: «Розробка системи електричної тяги змінного струму»

37 с., 4 рис., 30 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення енергоефективності, пропускної здатності та електромагнітної сумісності тягових мереж шляхом розробки та оптимізації структур систем електричної тяги змінного струму із застосуванням сучасних пристроїв компенсації реактивної потужності та інтелектуального керування, а також інженерне проектування, алгоритмічна оптимізація та апаратна реалізація високоефективної системи електричної тяги на базі асинхронного приводу, адаптованої до просторових обмежень, теплових режимів та вимог вибухозахисту рудникових локомотивів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести комплексний аналіз конфігурацій тягових мереж змінного струму промислової частоти та їхнього впливу на живлячу трифазну енергосистему (проблеми несиметрії напруг, генерації вищих гармонік та зниження коефіцієнта потужності).

Спроекувати силову топологію тягового перетворювача (автономного інвертора напруги на базі IGBT- або SiC-модулів), враховуючи специфіку живлення від акумуляторної батареї або контактної мережі постійного струму з високим рівнем завад.

Обґрунтувати вибір оптимальної системи живлення (класична або автотрансформаторна) для ділянок із різною густотою та масою поїздів.

Розробити масогабаритні та теплові моделі для інтеграції тягових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором у наявні габарити екіпажної частини електровоза.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробити математичні моделі перехідних та усталених процесів у тяговій мережі з урахуванням змінного характеру навантаження та розподілених параметрів контактної підвіски.

Створити комплексну систему відведення тепла (наприклад, рідинне охолодження або теплові труби) для силової електроніки, що розміщується у герметичних вибухонепроникних оболонках.

Запропонувати інтеграцію пристроїв FACTS (Flexible AC Transmission Systems), зокрема STATCOM, для динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування струмів у точках приєднання до зовнішньої мережі.

Синтезувати мікропроцесорні алгоритми бездатчикового векторного керування (Sensorless FOC) для забезпечення номінального тягового моменту на нульових швидкостях (під час рушання поїзда з місця).

Дослідити взаємодію сучасного рухомого складу з чотириквadrантними перетворювачами (4qS) та тягової мережі, мінімізувавши ризики виникнення низькочастотних резонансів.

Розробити апаратно-програмний комплекс захисту системи тяги від струмів короткого замикання, перенапруг, перегріву та втрати ізоляції.

ЕЛЕКТРИЧНА ТЯГА, ЗМІННИЙ СТРУМ, РУДНИКОВИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, НЕСИМЕТРІЯ НАПРУГ, FACTS, STATCOM, АВТОТРАНСФОРМАТОР, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Втрати напруги в контактній мережі та її визначення	14
Розділ 2. Визначення довжини живильного крила	19
Розділ 3. Устаткування тягових підстанцій при відкочуванні змінним струмом	24
Розділ 4. Приклад визначення кількості підстанцій на горизонті	27
Висновки	30
Список використаних джерел	32
Додаток А.....	36
Додаток Б	37

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Вступ

Парадигма переходу до тяги змінного струму в гірничій галузі

Світова практика створення тягового рухомого складу для підземних робіт однозначно свідчить про повну відмову від двигунів постійного струму на користь асинхронного тягового приводу.

Умови вугільних шахт (наявність метану та струмопровідного пилу) вимагають ідеальної іскробезпеки, яку колекторні машини забезпечити не можуть.

Розробка власної, вітчизняної системи тяги змінного струму є критично важливим кроком для модернізації застарілого парку шахтних локомотивів, підвищення їхньої продуктивності та зниження експлуатаційних витрат.

Інженерні виклики проектування апаратної частини

Головна проблема розробки полягає не у виборі самого електродвигуна, а у створенні надійного перетворювача частоти (інвертора), який би стабільно працював у надзвичайно жорстких умовах шахти.

По-перше, це обмежений простір.

Усі силові модулі, конденсатори фільтра (DC-link), драйвери керування та мікропроцесорна плата повинні бути компактно розміщені всередині товстостінної вибухонепроникної оболонки (маркування Ex d).

По-друге, це проблема охолодження.

Оскільки вибухозахищена оболонка є герметичною, традиційне наскрізне повітряне охолодження електроніки неможливе.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробнику необхідно спроектувати складну систему терморегуляції — передачу тепла від напівпровідникових кристалів до радіаторів, що контактують із зовнішнім середовищем, або впровадити рідинний контур охолодження, що є нетривіальним завданням для мобільних машин.

Алгоритмічна складність та адаптивне керування

Керування асинхронним двигуном у тяговому режимі суттєво відрізняється від стаціонарних промислових застосувань (насосів чи вентиляторів).

Шахтний електровоз має рушати з місця на крутих підйомах із важким составим вагонеток, часто — на брудних та слизьких рейках.

Розробка програмної частини передбачає синтез алгоритмів векторного керування з орієнтацією по полю ротора.

Оскільки встановлення механічних датчиків швидкості (енкодерів) на осях колісних пар у шахті є ненадійним рішенням через вібрації та бруд, система повинна базуватися на "бездавачевих" (sensorless) математичних моделях.

Мікроконтролер має в реальному часі обчислювати швидкість ротора та магнітний потік, спираючись виключно на миттєві значення фазних струмів та напруг.

Це вимагає розробки складних програмних спостерігачів (наприклад, розширеного фільтра Калмана або адаптивних моделей з еталонною системою).

Комплексний захист та діагностика

Невід'ємною складовою розробки є інтелектуальна система захисту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи високу вартість силових IGBT-модулів, система повинна миттєво (за мікросекунди) розпізнавати ненормальні режими: пробій ізоляції двигуна, заклинювання колісної пари, критичне падіння напруги в тяговій батареї або перегрів кристалів транзисторів.

Науково-практичне значення

Розроблена архітектура системи електричної тяги змінного струму дозволить перетворити рудниковий електровоз на інтелектуальну машину.

Практичним результатом стане створення тягового комплексу, який матиме на 15-20% вищий ККД порівняно з реостатними системами, здатність до глибокого рекуперативного гальмування та можливість інтеграції локомотива в загальношахтну цифрову систему диспетчеризації через бездротові канали зв'язку.

Еволюція та переваги тяги змінного струму

Електрифікація залізниць на змінному струмі промислової частоти є світовим стандартом для вантажних перевезень.

Порівняно із системами постійного струму, змінний струм дозволяє передавати значно більші потужності при менших струмах. Це радикально знижує втрати енергії в контактній мережі, дозволяє зменшити переріз мідних проводів та збільшити відстань між тяговими підстанціями.

Проте розробка та експлуатація таких систем супроводжується низкою специфічних електротехнічних викликів, які потребують глибокого наукового підходу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вплив на зовнішню енергосистему (Проблема якості електроенергії)

Головна фундаментальна проблема систем електричної тяги змінного струму полягає в тому, що тягові підстанції є потужними однофазними, нелінійними та асиметричними споживачами для трифазної енергосистеми загального призначення.

Це призводить до трьох негативних явищ:

1. **Несиметрія напруг:** Споживання струму лише з двох фаз викликає появу струмів зворотної послідовності. Це призводить до перегріву роторів синхронних генераторів на електростанціях та погіршення роботи асинхронних двигунів у суміжних споживачів.
2. **Реактивна потужність:** Хоча сучасні локомотиви з транзисторними перетворювачами мають коефіцієнт потужності, близький до одиниці, індуктивний опір самої контактної мережі та тягових трансформаторів залишається високим.
3. **Гармонійні спотворення:** Робота випрямлячів на локомотивах генерує вищі гармоніки, що спотворюють синусоїдальність напруги.

Падіння напруги в тяговій мережі змінного струму описується векторним рівнянням, яке в спрощеному вигляді має простий вигляд.

До нього входять:

струм навантаження;

активний опір ділянки мережі;

реактивний (індуктивний) опір

коефіцієнт потужності рухомого складу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки для ліній змінного струму, саме реактивна складова струму відіграє вирішальну роль у зниженні напруги на струмоприймачі.

Сучасні методи вирішення

Для ліній з великоваговим рухом класичної системи часто виявляється недостатньо через високе падіння напруги та електромагнітний вплив на лінії зв'язку.

Ефективним рішенням є впровадження системи живлення з автотрансформаторами (АТ).

У цій системі енергія передається від підстанції (між живильним проводом і контактною підвіскою), а на струмоприймач локомотива подається через лінійні автотрансформатори, встановлені на кожній ділянці.

Для компенсації несиметрії та реактивної потужності сучасна наука пропонує відмову від пасивних фільтро-компенсуючих пристроїв на користь активних систем FACTS:

- **STATCOM (Static Synchronous Compensator):** Генерує або споживає реактивну потужність у режимі реального часу, миттєво реагуючи на зміну графіка руху поїздів.
- **Симетруючі трансформатори (Скотта, Леблана):** Спеціальні схеми з'єднання обмоток тягових трансформаторів, які частково перетворюють трифазну систему в двофазну ортогональну, зменшуючи струми зворотної послідовності.

Порівняння структур живлення змінного струму

Характеристи ка	Система класична	Система (АТ)
Відстань між підстанціями	40 - 60 %	80 - 100 %
Падіння напруги в лінії	Високе	Дуже низьке
Електромагніт ний вплив на суміжні лінії	Значний (потребує екранування)	Мінімальний (струм у землі практично відсутній)
Капітальні витрати на інфраструктуру	Базові	Високі (додатковий провід, автотрансформатори)
Оптимальна сфера застосування	Звичайні вантажні лінії	Важковаговий рух

Практичне значення

Розробка та оптимізація систем змінного струму є критично важливою задачею для оновлення залізничної інфраструктури.

Впровадження інтелектуальних систем компенсації (STATCOM) та перехід на системи (АТ) дозволить забезпечити надійне живлення нових поколінь електровозів, підвищити загальну енергоефективність

транспортного коридору та усунути штрафи з боку оператора енергосистеми за погіршення показників якості електроенергії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Втрати напруги в контактній мережі та її визначення

При проектуванні системи електропостачання виникає ряд завдань, пов'язаних з визначенням числа та місця розташування тягових підстанцій, вибором обладнання для підстанцій, а також конструктивного виконання контактної мережі.

Втрата напруги в мережі залежить від величини навантаження, мережею, що живиться, і місця застосування навантажень.

Зазвичай при розрахунках розглядають найбільш несприятливий режим роботи мережі, як щодо величини навантажень, і щодо місця їх застосування.

Так, наприклад, при роботі чотирьох електровозів на одному крилі мережі слід вважати, що найбільш віддалений електровоз рухається з пусковим струмом, а два інших знаходяться в режимі, що встановився - один рухається до стовбура, а інший від стовбура.

На відстані $1/2 \ell_{\text{ут}}$ та $2/3 \ell_{\text{ут}}$ довжини крила мережі.

У разі роботи одного електровоза на крилі його слід вважати розташованим наприкінці ділянки мережі та споживаючим пусковий струм.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1				Лім.	Лист	Листів
Розробив	ДобрознайР.О.										
Перевірив	Сінчук О.М.									14	5
Реценз.									КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	ПересунькоІ.І.										

При двох працюючих електровозах приймаємо один електровоз розташованим в кінці лінії в режимі пуску, а інший на 1/3 довжини лінії в русі, що встановився.

При роботі трьох електровозів вважаємо, що в русі знаходиться два - один у пусковому режимі в найбільш віддаленій точці мережі, інший в режимі, що встановився, на відстані 2/3 лінії.

На підставі відстаней електровозів від пункту живлення (в метрах) і споживаних ними струмів (в Амперах) складаємо розрахункові схеми і визначаємо втрати напруги як на окремих ділянках, так і для найбільш віддаленого електровоза.

Втрата напруги може бути розрахована :

$$\Delta U = I_{\text{действ.}} \left(R_{\text{уг}} \cdot K_c + X_{\text{уг}} \cdot \sqrt{1 - K_c^2} \right)$$

де: $I_{\text{действ.}}$ — значення струму в контактній мережі. Для керованого мосту :

$$I_{\text{действ.}} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha - \gamma/2}{\pi}};$$

α - Кут управління перетворювачем;

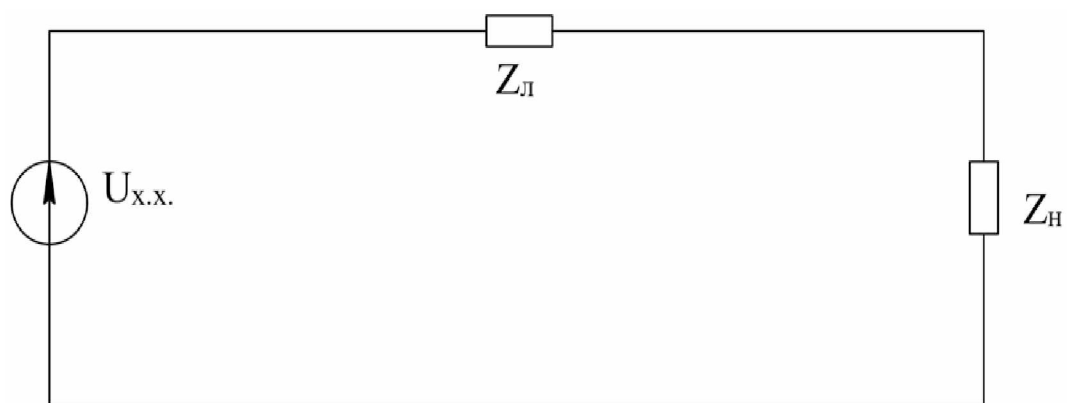
γ - Кут комутації вентилів;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

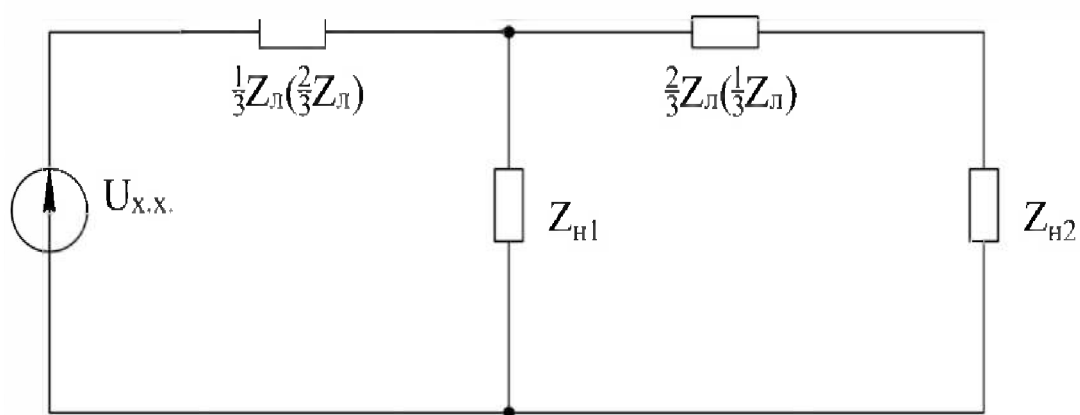
$R_{yг}, X_{yг}$ — активний та індуктивний опір ділянки мережі між джерелом живлення та споживачем;

K_c - Коефіцієнт зсуву мережного струму по відношенню до напруги U

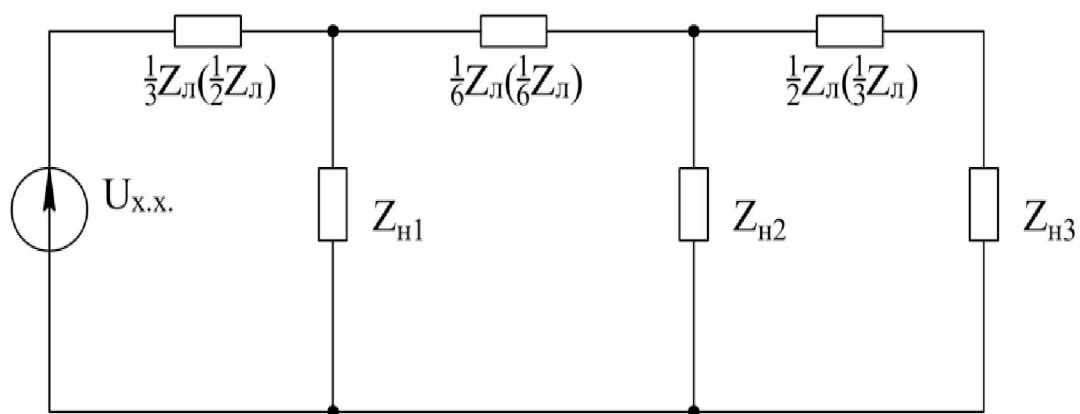
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)



в)

Рис. 3-1. Розрахункові схеми визначення втрат напруги під час роботи на секції: а — одного електровоза; б - двох (трьох) електровозів; в - чотирьох (п'яти) електровозів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04

Арк.

17

може бути визначено :

$$K_c = \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\gamma}{4}\right)$$

Активний та індуктивний опір можуть бути визначені через питомі опори контактної мережі $r_{уд}$ та $x_{уд}$ довжину ділянки $\ell_{уг}$:

$$R_{уг} = r_{уд} \cdot \ell_{уг}; \quad X_{уг} = x_{уд} \cdot \ell_{уг}.$$

Величина допустимої втрати напруги в мережі повинна визначатися виходячи з умови забезпечення середніх режимів під час руху на ділянці мережі.

Значення втрати напруги найбільш віддаленого споживача істотно впливає довжину живильного крила контактної мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Визначення довжини живильного крила

Значення довжини живильного крила залежить від кількості працюючих електровозів та їх режимів, а також від величини необхідної напруги, яка повинна забезпечуватися мережею при живленні найбільш віддаленого споживача.

Величина необхідної напруги з урахуванням комутації вентилів для рудничного електровоза змінного струму з напівкерованием мостовим перетворювачем може бути визначена:

$$U_c = \frac{U_d}{0,45 [1 + \cos(\gamma + \alpha)]};$$

де U_d значення необхідної випрямленої напруги.

Кут комутації γ визначається виразом:

$$\gamma = \text{Arccos} \left(1 - \frac{I_d}{I_{\text{к.з.}}} \right);$$

де: $I_{\text{к.з.}}$ - струм короткого замикання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-01		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2		
Розробив	Добрознай Р.О.						
Перевірів	Сінчук О.М.						
Реценз.							
Н. Контр.	Сінчук О.М.						
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-23ск		
					Літ.	Лист	Листів
						19	5

Струм короткого замикання

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{хх.тр}}}{\sqrt{R_{\text{уг}}^2 + X_{\text{уг}}^2}}$$

Виразивши опір ділянки мережі через питомі значення та довжину ділянки маємо:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{хх.тр.}}}{\ell_{\text{уг}} \sqrt{z_{\text{уд}}^2 + x_{\text{уд}}^2}}$$

Враховуючи (2.2); (2.3); та (2.4) можна переписати :

$$U_c = \frac{U_{d \text{ тр.}}}{0,45 \left\{ 1 + \cos \left[a \cos \left(1 - \frac{I_d \cdot \ell_{\text{уг}} \sqrt{z_{\text{уд}}^2 + x_{\text{уд}}^2}}{U_{\text{хх тр}}} \right) + \alpha \right] \right\}}$$

Необхідне значення напруги $U_{d \text{ тр}}$ визначається швидкістю обертання тягових двигунів.

Припустивши, що максимальна швидкість двигунів виходить при номінальній напрузі можна знайти значення необхідної напруги виходячи із співвідношення:

$$\frac{U_{dн}}{V_{max}} = \frac{U_{d тр.}}{V_{тр.}} \quad \text{или} \quad U_{d тр.} = \frac{U_{dн} \cdot V_{тр.}}{V_{max}}$$

Допустима втрата напруги в контактній мережі визначиться:

$$\Delta U_{доп} = U_{хх.тр} - U_c$$

При максимальній довжині ділянки контактної мережі величина допустимої втрати напруги $\Delta U_{доп}$ дорівнюватиме розрахунковій втраті напруги отриманої з виразу (2.1).

Залежності довжини крила контактної мережі від необхідної швидкості руху електровозів за різної їх кількості дільниці наведено на рис. 2-1.

Ці характеристики дозволяють визначити довжину живильного крила контактної мережі, що є важливим при виборі місця розташування тягових підстанцій та вирішенні питання кількості підстанцій на горизонті.

При підстановці $U_{d\text{тр}}$ вираз (2.7) необхідно враховувати схему з'єднання двигунів на електровозі (двигуни включені послідовно або паралельно).

Розрахунок довжини живильного крила доцільно проводити для двох рівнів напруг в контактній мережі (660 для квершлагу і 380 для штреків і ортів заїздів).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

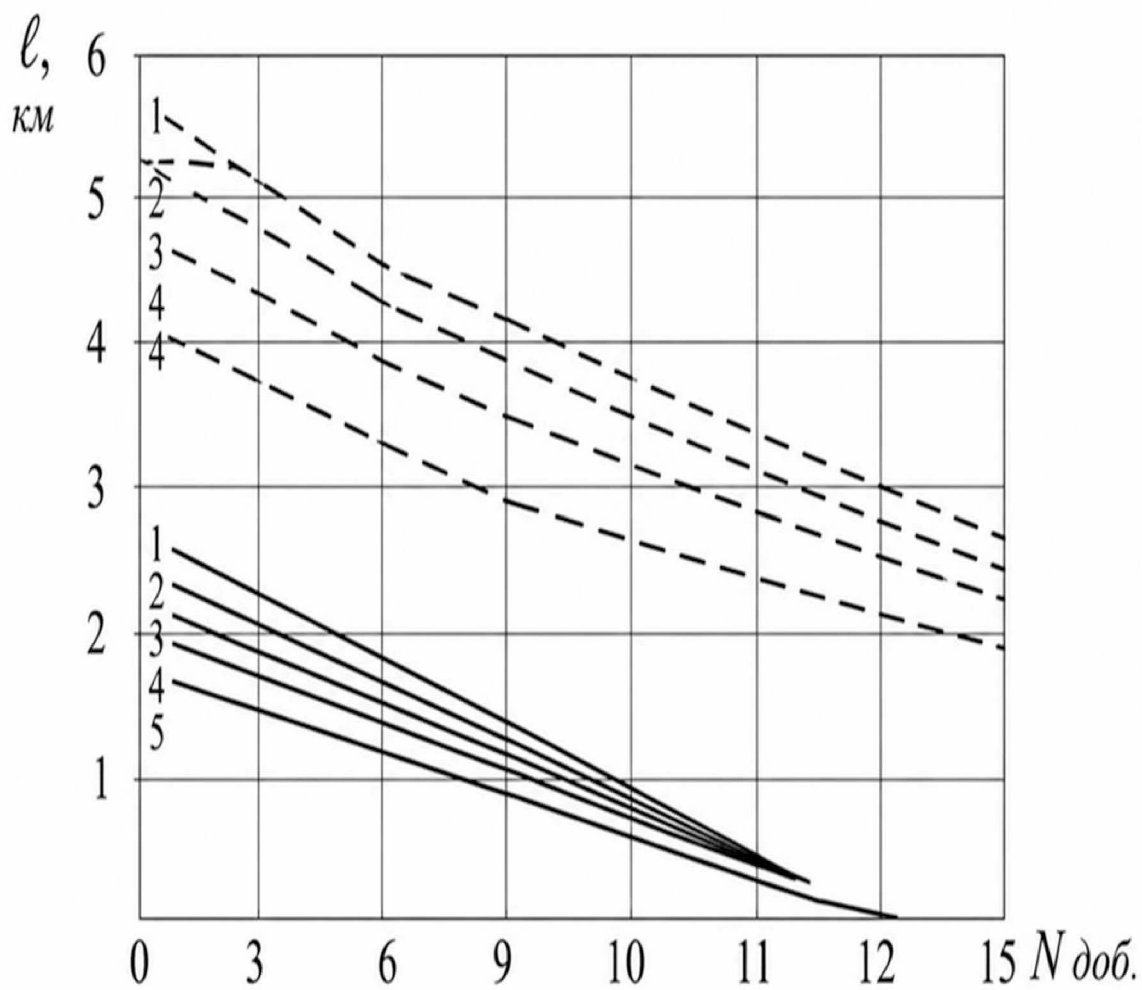


Рис. 2-1. Залежність довжини проводу підстанції, що живиться, від необхідних швидкостей руху електровозів, (1÷5 — кількість електровозів на крилі; — для напруги $U_{xx} = 0,4 \text{ кВ}$; — — — для напруги $U_{xx} = 0,69 \text{ кВ}$).

Розділ 3. Устаткування тягових підстанцій при відкочуванні змінним струмом

Істотною перевагою відкатки змінного струму в порівнянні з існуючою відкаткою постійного струму є те, що на тягових підстанціях скасовуються перетворювальні агрегати.

Таким чином тягова підстанція значно спрощується перетворюючись на трансформаторний живильний пункт.

Тягова підстанція може бути поєднана зі штрековою або ортовою підстанціями, які зазвичай розташовані в центрі навантажень блоку або шляхом встановлення в ніші пересувної трансформаторної підстанції.

Потужність тягового трансформатора визначається, виходячи з максимального навантаження найбільш завантаженої ділянки контактної мережі. Найбільш правильно було б визначати навантаження тягової підстанції за графіком навантаження.

У першому наближенні навантаження можна розрахувати виходячи з методу коефіцієнта попиту [11]:

$$S_{\text{тр}} = K_c \cdot I_{\Sigma \text{уг}} \cdot U_{\text{л}} \cdot \sqrt{3}$$

I_{Σ} - Сумарний лінійний струм ділянки контактної мережі;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3			Літ.	Лист	Листів
Розробив	Добрознай Р.О.									
Перевірів	Сінчук О.М.								24	3
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук О.М.									
Затвердив	Пересунько І.І.									

U_L - Лінійна напруга на ділянці;

K_c - Коефіцієнт попиту.

У разі застосування пересувної трансформаторної підстанції для цілей тяги, комутаційну апаратуру вибирати не потрібно, оскільки пересувні підстанції укомплектовані комутаційною та захисною апаратурою.

У разі влаштування тягової підстанції поєднаної зі штрекової або ортової як комутаційний апарат для управління напругою контактної мережі доцільно застосувати магнітний пускач оскільки він легко дозволяє автоматизувати процес керування тяговими навантаженнями.

При виборі комутаційної апаратури необхідно орієнтуватися на номінальний струм з урахуванням коефіцієнта попиту:

$$I = K_c \sum I_{\text{нгр}}$$

А так само необхідно перевірити обраний апарат по найбільшому струму, що відключається (розривному).

$$I_{\text{откл}} \geq 1,2 I_{\text{к.з.}}^{(3)} = 1,2 \frac{I_{\text{тр.н}}}{U_{\text{к.з.}}} \cdot 100;$$

де $I_{\text{тр.н}}$ номінальний струм трансформатора

$U_{\text{к.з.}}$ - Напруга короткого замикання тр-ра.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим є питання захисту трансформатора і контактної мережі від аварійних режимів.

Захист від коротких замикань здійснюється за допомогою МТЗ якого оснащені комутаційні апарати.

Вибір уставки провадиться в установленому порядку.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 4. Приклад визначення кількості підстанцій на горизонті

Зробимо розрахунок тягового електропостачання в умовах шахти Артем І ($\ell_{\text{ср}} = 1000\text{м}$; $q_{\text{гор(см)}} = 10000\text{ т}$).

Визначимо кількість електровозів на горизонті з огляду на час знаходження електровоза в русі:

$$t_{\text{дв}} = t_{\text{см}} - t_{\text{погр.}} - t_{\text{разгр.}} - t_{\text{прост.}} - t_{\text{маневр.}}$$

На підставі хронометражних спостережень проведених труху становить 30% робочого часу зміни:

$$t_{\text{дв.}} = 0,3 \cdot t_{\text{см}} = 0,3 \cdot 7 = 2,1 \text{ год.}$$

Можлива кількість рейсів одного електровоза при середньозваженій довжині відкатки $\ell_{\text{ср}} = 1000\text{м}$:

$$n_{\text{рейс.}} = \frac{V_{\text{ср}} \cdot t_{\text{дв}}}{2 \ell_{\text{ср}}} = \frac{8,5 \cdot 2,1}{2} = 9 \text{ рейс.}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Добрознай Р.О.				Розділ 4	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук О.М.						27	3
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-23ск		

Змінна продуктивність одного електровоза може бути визначена:

$$q_{\text{см}} = q_{\text{сост.}} \cdot n_{\text{рейс.}} = 80 \cdot 9 = 720 \text{ т/змін.}$$

де: $q_{\text{сост.}}$ - Кількість гірничої маси, що перевозиться одним складом.

Необхідна кількість електровозів N для забезпечення змінної продуктивності горизонту дорівнює:

$$N = \frac{q_{\text{гор(см)}}}{q_{\text{см}}} = \frac{10000}{720} \approx 14 \text{ ел-возів}$$

Виходячи з передбачуваного розміщення підстанцій - одна в квершлагоу і одна в штреку визначаємо кількість електровозів на одне крило підстанції:

$$N_{\text{кр}} = 4 \text{ ел-воза.}$$

За кривими рис. 2-1 визначаємо довжину крила підстанції та уточнюємо кількість підстанцій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Довжина живильного крила дорівнює 1100 м при 4-х працюючих електровозах у разі живлення відкатки від трансформатора з напругою $U_{xx} = 0,4\text{кВт}$.

Отже, для забезпечення середньої швидкості $V_{cp} = 8,5\text{км/год}$ достатньо встановити один трансформатор у центрі навантаження (у місці перетину штреку з квершлагом).

При цьому довжина крила при 5-ти працюючих електровозах буде 1000 м-коду.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

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

Провести комплексний аналіз конфігурацій тягових мереж змінного струму промислової частоти та їхнього впливу на живлячу трифазну енергосистему (проблеми несиметрії напруг, генерації вищих гармонік та зниження коефіцієнта потужності).

Спроекувати силову топологію тягового перетворювача (автономного інвертора напруги на базі IGBT- або SiC-модулів), враховуючи специфіку живлення від акумуляторної батареї або контактної мережі постійного струму з високим рівнем завад.

Обґрунтувати вибір оптимальної системи живлення (класична або автотрансформаторна) для ділянок із різною густотою та масою поїздів.

Розробити масогабаритні та теплові моделі для інтеграції тягових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором у наявні габарити екіпажної частини електровоза.

Розробити математичні моделі перехідних та усталених процесів у тяговій мережі з урахуванням змінного характеру навантаження та розподілених параметрів контактної підвіски.

Створити комплексну систему відведення тепла (наприклад, рідинне охолодження або теплові труби) для силових електроніки, що розміщується у герметичних вибухонепроникних оболонках.

Запропонувати інтеграцію пристроїв FACTS (Flexible AC Transmission Systems), зокрема STATCOM, для динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування струмів у точках приєднання до зовнішньої мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Синтезувати мікропроцесорні алгоритми бездатчикового векторного керування (Sensorless FOC) для забезпечення номінального тягового моменту на нульових швидкостях (під час рушання поїзда з місця).

Дослідити взаємодію сучасного рухомого складу з чотириквADRантними перетворювачами (4qS) та тягової мережі, мінімізувавши ризики виникнення низькочастотних резонансів.

Розробити апаратно-програмний комплекс захисту системи тяги від струмів короткого замикання, перенапруг, перегріву та втрати ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2018). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance (3rd ed.). Publicis Publishing.
2. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
3. Brenna, M., Foadelli, F., & Zaninelli, D. (2018). Electrical Railway Transportation Systems. IEEE Press/Wiley.
4. Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press/Wiley.
5. Wu, C. J., & Chen, S. L. (1998). Assessment of reactive power compensation configuration for an AC railway system. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 145(5), 295-300.
6. Chen, S. L., Li, R. J., & Hsi, P. H. (1993). Traction system unbalance problem-analysis methodologies. IEEE Transactions on Power Delivery, 8(4), 1614-1620.
7. Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press.
8. Tan, P. C., Loh, P. C., & Holmes, D. G. (2004). A robust multilevel active filter for electrified railway applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 19(4), 1047-1054.
9. Ozelgin, H. F. (2009). Railway electrification systems and power quality. Przegląd Elektrotechniczny, 85(12), 22-26.

10. Hu, H., He, Z., & Gao, S. (2012). Passive-filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(1), 505-514.
11. Pilo, E., Rouco, L., Fernandez, A., & Hernandez-Velilla, A. (2000). A simulation tool for the design of the electrical supply system of high-speed railways. *Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2, 1054-1059.
12. CENELEC. (2010). EN 50163: Railway applications - Supply voltages of traction systems. European Committee for Electrotechnical Standardization.
13. Midya, P., Bhowmick, S., & Kumar, P. (2020). Mitigation of power quality issues in 25 kV AC traction systems using custom power devices: A review. *IET Power Electronics*, 13(15), 3295-3312.
14. Kneschke, T. A. (1985). Control of utility system unbalance caused by single-phase electric traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21(6), 1559-1570.
15. Holtz, J., & Krah, J. O. (1989). Suppression of time-varying resonances in the power supply line of AC locomotives by inverter control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 36(4), 523-529.
16. Bose, B. K. (2020). *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends* (2nd ed.). Academic Press.
17. Steimel, A. (2012). *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag.
18. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press.

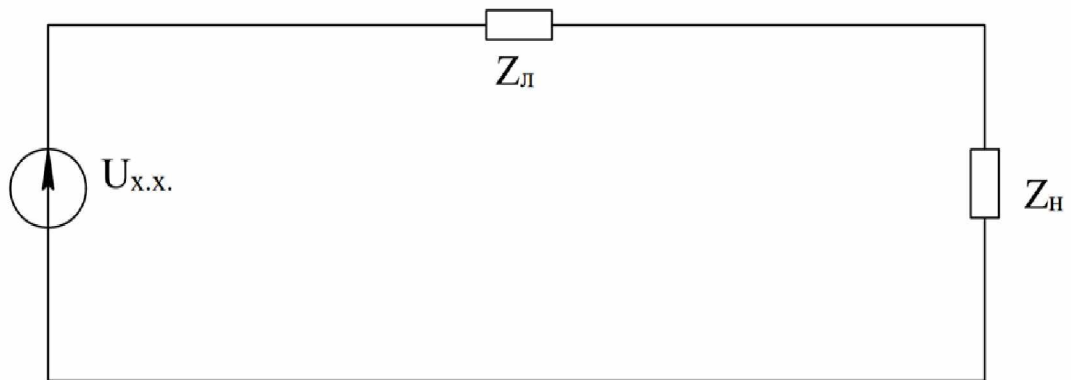
19. Standard IEC 60079-1:2014. Explosive atmospheres - Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures "d".
20. Trzynadlowski, A. M. (2000). Control of Induction Motors. Academic Press.
21. Holtz, J. (2002). Sensorless control of induction motor drives. Proceedings of the IEEE, 90(8), 1359-1394.
22. Kondo, K. (2010). Recent trend of traction drive systems for railway vehicles. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1), 1-8.
23. Schenk, J., & Miller, G. (2014). Energy-efficient automated control algorithms for battery-powered mining locomotives. Journal of Cleaner Production, 52, 210-218.
24. Pugi, L., Rindi, S., & Ercole, G. (2013). Modelling and simulation of harsh environment industrial locomotives: Adhesion and traction control. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 20(1), 54-76.
25. Lipo, T. A. (2017). Vector Control and Dynamics of AC Drives. Oxford University Press.
26. Novák, T., & Sottile, J. (2011). Advanced control strategies for battery-powered underground mining vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(6), 2634-2642.
27. Spagnolo, A., & Pugi, L. (2016). Real-time simulation and optimization of traction drives for light rail and industrial vehicles. Simulation Modelling Practice and Theory, 60, 114-131.
28. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.

29. Plakhtii, V., & Nerubatskyi, V. (2020). Improving the efficiency of AC traction drive of mine locomotives based on vector control. E3S Web of Conferences, 168, 00035.

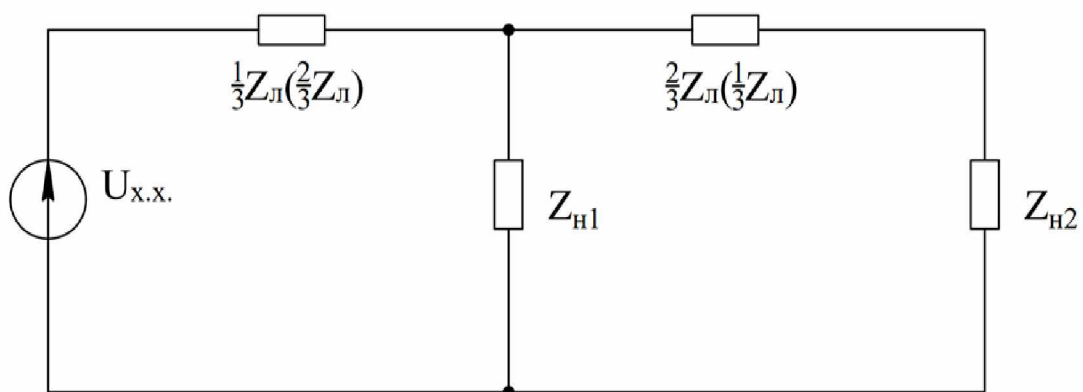
30. Chadwick, B., & Gurgenci, H. (2012). Simulation-based performance optimization of underground electric haulage systems. Mining Technology, 121(1), 15-24.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-04	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

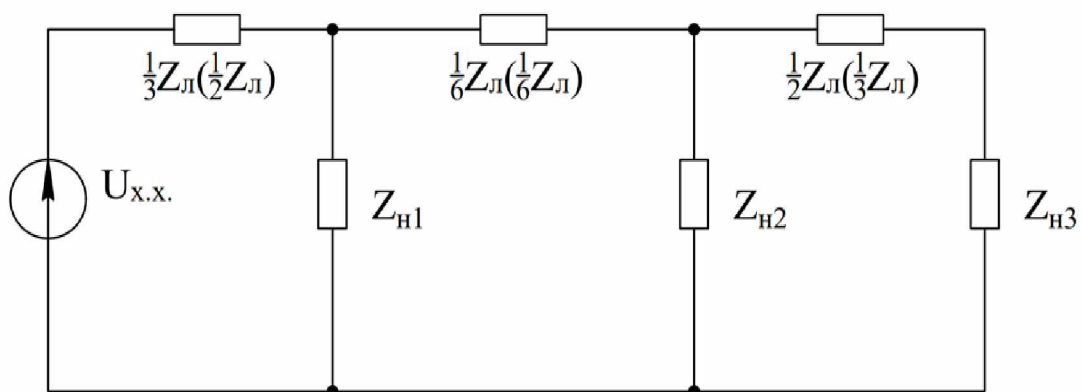
Розрахункові схеми визначення втрат напруги під час роботи на секції:
а — одного електровоза; б - двох (трьох) електровозів; в - чотирьох (п'яти) електровозів.



а)



б)



в)

Додаток Б

Залежність довжини проводу підстанції, що живиться, від необхідних швидкостей руху електровозів, (1÷5 — кількість електровозів на крилі; — для напруги $U_{xx} = 0,4\text{кВ}$; — — — для напруги $U_{xx} = 0,69\text{кВ}$).

