

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 перенапруги у контактній мережі та силових колах
промислового електровозу ЕЛ-1**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Дмитро КОЛОМОЄЦЬ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор 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

КОЛОМОЄЦЬ Дмитро Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та
силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Актуальність дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1; II. Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1; III. Експериментальні дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Схема захисту електровозу від атмосферної перенапруги; II. Схема вимірювання перенапруги на тяговій підстанції; III. Принципова силова схема електровоза ЕЛ-1 з вимірюванням перенапруги; IV. Результати вимірювання перенапруги; V. Результати вимірювання перенапруги.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика контактної мережі та силових кіл промислового електровозу ЕЛ-1	24.05.26
2	Процес старіння ізоляції тягових двигунів промислових електровозів	29.05.26
3	Перевантаження, що виникають у контактних мережах та силових ланцюгах електровозного транспорту	02.06.26
4	Розробка захисту від режимів перенапруги	07.06.26
5	Експериментальні дослідження режимів перенапруги	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Дмитро КОЛОМОЄЦЬ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1»

43 с., 5 рис., 27 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення надійності роботи тягового електрообладнання та безперебійності кар'єрного транспорту шляхом комплексного аналізу природи виникнення перенапруг у тяговій мережі постійного струму 1.5 кВ та розробки рекомендацій щодо оптимізації систем апаратного захисту, а також аналіз фізичної природи, причин виникнення та наслідків впливу комутаційних і атмосферних перенапруг на електрообладнання промислового кар'єрного електровозу ЕЛ-1 (напруга 1,5 кВ постійного струму), а також розробка ефективних заходів щодо захисту ізоляції силових кіл для підвищення надійності тягового комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Здійснити аналіз специфічних умов експлуатації електровоза ЕЛ-1 (наявність верхнього та бічного струмознімання, висока запиленість, робота у глибоких кар'єрах).

Провести класифікацію та статистичний аналіз типів перенапруг (комутаційні, атмосферні, квазістаціонарні), характерних для відкритих гірничих розробок та кар'єрних контактних мереж.

Дослідити фізику виникнення комутаційних перенапруг під час розриву тягових кіл постійного струму з високою індуктивністю (при спрацьовуванні швидкодіючих вимикачів або відриві струмоприймача від контактного проводу).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідити перехідні електромеханічні та електромагнітні процеси, що виникають під час розриву струмів у високоіндуктивних колах тягових двигунів постійного струму електровоза ЕЛ-1.

Розробити математичну модель перехідних процесів для оцінки максимальних амплітуд перенапруг з урахуванням розподілених параметрів тягової мережі.

Оцінити вплив нестабільності струмознімання (відрив струмоприймача від контактного проводу, дугоутворення) на генерацію високочастотних імпульсів перенапруги у бортовій мережі локомотива.

Оцінити вплив атмосферних (грозових) перенапруг на ізоляцію тягових двигунів (ТЕД) та допоміжних машин електровоза.

Проаналізувати ефективність штатних засобів захисту (рогових і вентильних розрядників) та обґрунтувати доцільність їх заміни на сучасні нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) на базі оксидно-цинкових варисторів.

Обґрунтувати вибір сучасних нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН) та РС-ланцюгів для заміни застарілих розрядників.

Розробити рекомендації щодо впровадження додаткових РС-ланцюгів (снаберів) для локального придушення комутаційних сплесків безпосередньо на контакторах силової шафи.

ПРОМИСЛОВИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, КАР'ЄРНИЙ ТРАНСПОРТ,
ПЕРЕНАПРУГА, КОНТАКТНА МЕРЕЖА, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ,
КОМУТАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС, СТРУМОПРИЙМАЧ, ІНДУКТИВНІСТЬ
ТЯГОВОГО КОЛА, ОБМЕЖУВАЧ ПЕРЕНАПРУГИ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Актуальність дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1	14
1.1. Характеристика контактної мережі та силових кіл промислового електровозу ЕЛ-1.....	14
1.2. Процес старіння ізоляції тягових двигунів промислових електровозів, що працюють у кар'єрах для транспортування кам'яних мас.....	15
Розділ 2. Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1.....	17
2.1. Перевантаження, що виникають у контактних мережах електровозного транспорту та силових ланцюгах електровозів.....	17
2.2. Розробка захисту від режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1.....	19
2.3. Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1 які виникають при відключенні високошвидкісного автоматичного вимикача на підстанції тяги	22
2.4. Дослідження режимів внутрішньої перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1.....	25
Розділ 3. Експериментальні дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1	27
3.1. Експериментальні дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1 у динамічних режимах роботи.....	27

3.2. Побудова гістограм розподілу стрибків з різними рівнями режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1	29
3.3. Порівняльний аналіз режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1	33
Висновки	34
Список використаних джерел	36
Додаток А.....	39
Додаток Б	40
Додаток В	41
Додаток Г	42
Додаток Д.....	43

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Специфіка експлуатації електровоза ЕЛ-1 у кар'єрах

Промислові електровози серії ЕЛ-1 є одними з найпотужніших представників тягового рухомого складу, що використовуються на відкритих гірничих розробках (кар'єрах) для транспортування гірничої маси.

Вони працюють у системі тяги постійного струму з номінальною напругою 1500 В.

Умови експлуатації такого транспорту характеризуються екстремальними навантаженнями: рух поїздів великої маси зтяжними ухилами (до 40-50 проміле), постійний вплив абразивного пилу, вібрацій, різких перепадів температур та високої вологості.

У таких жорстких умовах стан ізоляції тягових двигунів, силових кабелів та комутаційної апаратури має вирішальне значення.

Проте саме ізоляція найчастіше стає мішенню для руйнівного впливу перенапруг — короткочасних сплесків напруги, амплітуда яких може в рази перевищувати номінальне значення.

Джерела та природа виникнення перенапруг

Перенапруги в силових колах електровоза ЕЛ-1 та його контактній мережі поділяються на дві основні категорії:

- Атмосферні (блискавкові) перенапруги. Кар'єрна контактна мережа має значну протяжність і розташована на відкритій місцевості, що робить її ідеальним приймачем для прямих ударів блискавки або індукованих розрядів. Такі перенапруги характеризуються величезною амплітудою (десятки кіловольт) і крутим фронтом хвилі. Якщо хвиля перенапруги

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягає струмоприймача локомотива, вона здатна миттєво пробити ізоляцію дахового обладнання та тягових машин на корпус.

- Комутаційні (внутрішні) перенапруги. Це найпоширеніший і найнебезпечніший вид перенапруг у повсякденній експлуатації. Вони виникають внаслідок розриву індуктивних кіл. Тягові двигуни електровоза ЕЛ-1 мають величезну індуктивність. Під час роботи контакторів (перемикання ступенів реостата, відключення двигунів) енергія, накопичена в магнітному полі, вивільняється у вигляді ЕРС самоіндукції, утворюючи потужну електричну дугу та сплески напруги. Іншим критичним джерелом комутаційних перенапруг є відрив полоза струмоприймача (пантографа) від контактного проводу через нерівності підвіски, наявність льоду або бруду на дроті. Кожен такий мікро-відрив генерує електричну дугу, що супроводжується високочастотними коливаннями напруги, які поширюються всією бортовою мережею.

Проблема застарілих систем захисту

Історично електровози ЕЛ-1 комплектувалися традиційними засобами захисту від перенапруг — роговими розрядниками (з магнітним дуттям) та вентильними розрядниками (типу РВК).

Ці апарати мають низку принципівих недоліків.

Вони характеризуються нестабільним часом спрацьовування, їхні характеристики погіршуються з часом через проникнення вологи, а залишкова напруга часто залишається занадто високою для надійного захисту "постарілої" ізоляції двигунів.

Через це на кар'єрах фіксується значний відсоток виходу з ладу тягових машин саме через пробій ізоляції лобових частин обмоток.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напрямки модернізації та наукова новизна

Актуальність цього дослідження полягає в обґрунтуванні необхідності переходу до сучасних систем захисту.

Установка нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), які не мають іскрових проміжків і миттєво реагують на найменші сплески напруги, зрізаючи їхню амплітуду до безпечного рівня, є ключовим рішенням.

Крім того, науковий інтерес становить моделювання роботи локальних демпферних (снаберних) кіл, що підключаються паралельно контактам силових апаратів електровоза для поглинання енергії дуги.

Практична реалізація результатів дослідження дозволить радикально знизити кількість аварійних виходів з ладу тягового електрообладнання, подовжити термін служби ізоляції, зменшити витрати на дорогі капітальні ремонти електродвигунів та мінімізувати простой кар'єрного транспорту.

Специфіка системи живлення електровоза ЕЛ-1

Промисловий електровоз ЕЛ-1 (робоча маса **150 т**) є класичним представником важкого тягового рухомого складу, що використовується на гірничо-збагачувальних комбінатах для вивезення гірничої маси з глибоких відкритих кар'єрів.

Локомотив працює від контактної мережі постійного струму з номінальною напругою **1.5 кВ**.

Особливістю кар'єрної тяги є використання як центрального (верхнього), так і бічного струмознімання, оскільки на екскаваторних коліях прокладання верхнього контактного проводу часто неможливе.

Експлуатація ЕЛ-1 супроводжується важкими перехідними електромеханічними процесами.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Через нерівності колії, коливання ґрунту під час вибухових робіт та наявність стиків на контактному проводі часто відбувається короткочасний відрив полоза струмоприймача.

Розрив електричного кола з великими струмами (до кількох кілоампер) призводить до виникнення значних перенапруг, які є головною причиною пробою ізоляції тягових електродвигунів (типу GBM-350/1500) та виходу з ладу апаратури керування.

Математичний опис комутаційних перенапруг

Силовa схема електровоза ЕЛ-1 та живляча контактна мережа утворюють складне коло з індуктивним L та ємнісним C характером.

При раптовому відключенні струму (наприклад, спрацьовування головного вимикача під навантаженням) магнітна енергія, накопичена в індуктивностях обмоток ТЕД і реакторів, переходить в електричну енергію еквівалентної ємності кола.

Базовий закон збереження енергії для ідеалізованого коливального контуру під час комутації має простий вигляд.

З урахуванням наявної робочої напруги мережі, максимальна очікувана амплітуда перенапруги U розраховується за простою формулою.

Оскільки співвідношення L та C (хвильовий опір) у мережах постійного струму є достатньо великим, навіть при відносно невеликих струмах напруга може досягати значень **4-6 кВ**, що критично для ізоляції двигунів, розрахованих на **1.5 кВ**.

Класифікація та вплив перенапруг на тягове обладнання

Вид перенапруги	Джерело та механізм виникнення	Вплив на електровоз ЕЛ-1	Способи захисту
Комутаційна (внутрішня)	Спрацьовування швидкодіючого вимикача, перемикання груп ТЕД (з послідовного на паралельне з'єднання), відрив пантографа.	Електрична дуга на контакторах, міжвиткові замикання в якорях ТЕД, круговий вогонь по колектору.	Встановлення РС-ланцюгів паралельно індуктивним навантаженням, використання бездугових контакторів.
Атмосферна (зовнішня)	Прямий удар блискавки у контактну мережу або індуковані перенапруги від розрядів поблизу кар'єру.	Амплітуда сягає десятків кіловольт. Миттєвий пробій головної ізоляції на корпус локомотива.	Встановлення обмежувачів перенапруги нелінійних (ОПН) на даху локомотива та вздовж контактної мережі.

Аварійна (режимна)	Короткі	Термічне	Надійна
	замикання в мережі, перехреснування з лініями вищого класу напруги (наприклад, повітряними лініями 6/10 кВ).	пошкодження проводів, перегорання плавких вставок, вибух акумуляторних батарей (якщо задіяні).	робота релейного захисту тягових підстанцій, гальванічна розв'язка.

Практичне значення досліджень

Глибоке розуміння параметрів хвильових процесів у тяговій мережі **1.5 кВ** дозволяє модернізувати застарілу апаратну базу електровоза ЕЛ-1.

Заміна традиційних рогових та вілітових розрядників на сучасні металооксидні обмежувачі перенапруги (які мають високу нелінійність вольт-амперної характеристики та позбавлені іскрових проміжків) дозволяє зрізати піки перенапруг з наносекундною швидкістю.

Це значно подовжує міжремонтний інтервал тягових двигунів та знижує експлуатаційні витрати гірничо-збагачувального комбінату.

Розділ 1. Актуальність дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

1.1. Характеристика контактної мережі та силових кіл промислового електровозу ЕЛ-1

З розвитком відкритого видобутку мінеральних руд електрична тяга широко використовується в кар'єрах, для ефективного використання якої надзвичайно важлива експлуатаційна надійність електрообладнання електровозів.

За даними депо електровозів, відсоток нерегулярних викликів електровозів до депо — це виклики через несправності тягових двигунів.

Одним із способів підвищити експлуатаційну надійність тягових двигунів є вдосконалення технологій їх ремонту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1			Літ.	Лист	Листів	
Розробив	КоломосьДЄ.										
Перевірів	Сінчук І.О.								14	3	
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	ПересунькоІ.І.										

1.2. Процес старіння ізоляції тягових двигунів промислових електровозів, що працюють у кар'єрах для транспортування кам'яних мас

До цього часу старіння ізоляції тягових двигунів промислових електровозів, що працюють у кар'єрах для транспортування кам'яних мас, не вивчалось.

Значення перенапруг у контактних мережах кар'єрів та силових схемах промислових електровозів, що впливають на ізоляцію тягових двигунів, також не були визначені.

Проводилися дослідження з цих питань [1, 2] у умовах електротранспорту на магістралі.

Оскільки умови експлуатації електричної тяги в кар'єрах і на залізницях

Міністерства залізниць суттєво відрізняються, результати вищезазначених досліджень не можна перенести на умови електричного транспорту до кар'єру.

Метою цього дослідження є визначення терміну служби ізоляції тягових двигунів і встановлення їх раціональних маршрутів капітального ремонту.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання: вивчення перенапруг у контактних мережах кар'єрів та силових схем електровозів; встановлення раціональних значень пробійної напруги для перевірки ізоляції обмоток тягових двигунів; вивчення міцності проникнення ізоляції обмоток тягових двигунів; визначення інтенсивності зниження міцності проникнення ізоляції та її терміну служби; технічна та економічна оцінка результатів досліджень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, дослідження процес старіння ізоляції тягових двигунів промислових електровозів, що працюють у кар'єрах для транспортування кам'яних мас, є актуальним завданням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

2.1. Перевантаження, що виникають у контактних мережах електровозного транспорту та силових ланцюгах електровозів

Перевантаження, що виникають у контактних мережах електровозного транспорту та силових ланцюгах електровозів, можна поділити на дві категорії:

- 1) зовнішні або атмосферні перевантаження, спричинені прямим ударом блискавки або викликані нею;
- 2) внутрішні, або перемикальні перенавантаження, що виникають під час перемикання в силових ланцюгах електровозів.

Перелічені перенавантаження відрізняються як за тривалістю експозиції, так і за величиною.

Значення наднапруг, що виникають внаслідок прямого удару блискавки, визначаються струмом блискавки — рівнем ізоляції контактної системи з опором заземлення полюсів.

Рівень ізоляції контактної системи, залежно від використаних ізоляторів, коливається від 70 ÷ 100 кВ.

Величина та ймовірність індукованих перенапруг залежать від струму блискавки, розташування розряду відносно контактної мережі, рівня ізоляції останньої та наявності рухомого складу на лінії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Коломось ДЄ.			Розділ 2	Літ.	Лист	Листів
Перевірив		Сінчук І.О.					17	10
Реценз.								
Н. Контр.		Сінчук І.О.						
Затвердив		Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-23ск		

Зі збільшенням кількості одиниць рухомого складу рівень індукованих перенапруг зменшується, оскільки це прискорює нейтралізацію потенціалу контактної мережі під час розряду лідера блискавки через зниження загального хвильового опору рухомого складу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Розробка захисту від режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

Захист від атмосферних перенапруг здійснюється: на контактній системі — за допомогою клапанних гасників і іскрових зазорів (класонних гасників); на електровозі — за допомогою клапанного розрядника, увімкненого відповідно до схеми на рис. 2.1.

Пробійна напруга зупинителя має бути меншою за рівень ізоляції тягових двигунів і в більшості випадків вважається дорівнюваною або на 15÷17% меншою за перенапругу експлуатаційного випробування.

Пробійна напруга затримача для захисту електрообладнання промислових електровозів при напрузі 1,5 кВ з змінною напругою 50 Гц має бути в межах 4,8–5,8 кВ.

Перемикальні перевантаження на електрообладнанні рухомого складу можуть виникати при відключенні високошвидкісного вимикача живлення на тяговій підстанції під навантаженням, а також під час від'єднання тягових підстанцій, під час режимів тяги та гальмування, проходження секційного ізолятора, відокремлення пантографа від контактного дроту при руху по ділянках із бічним поточним колектором.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

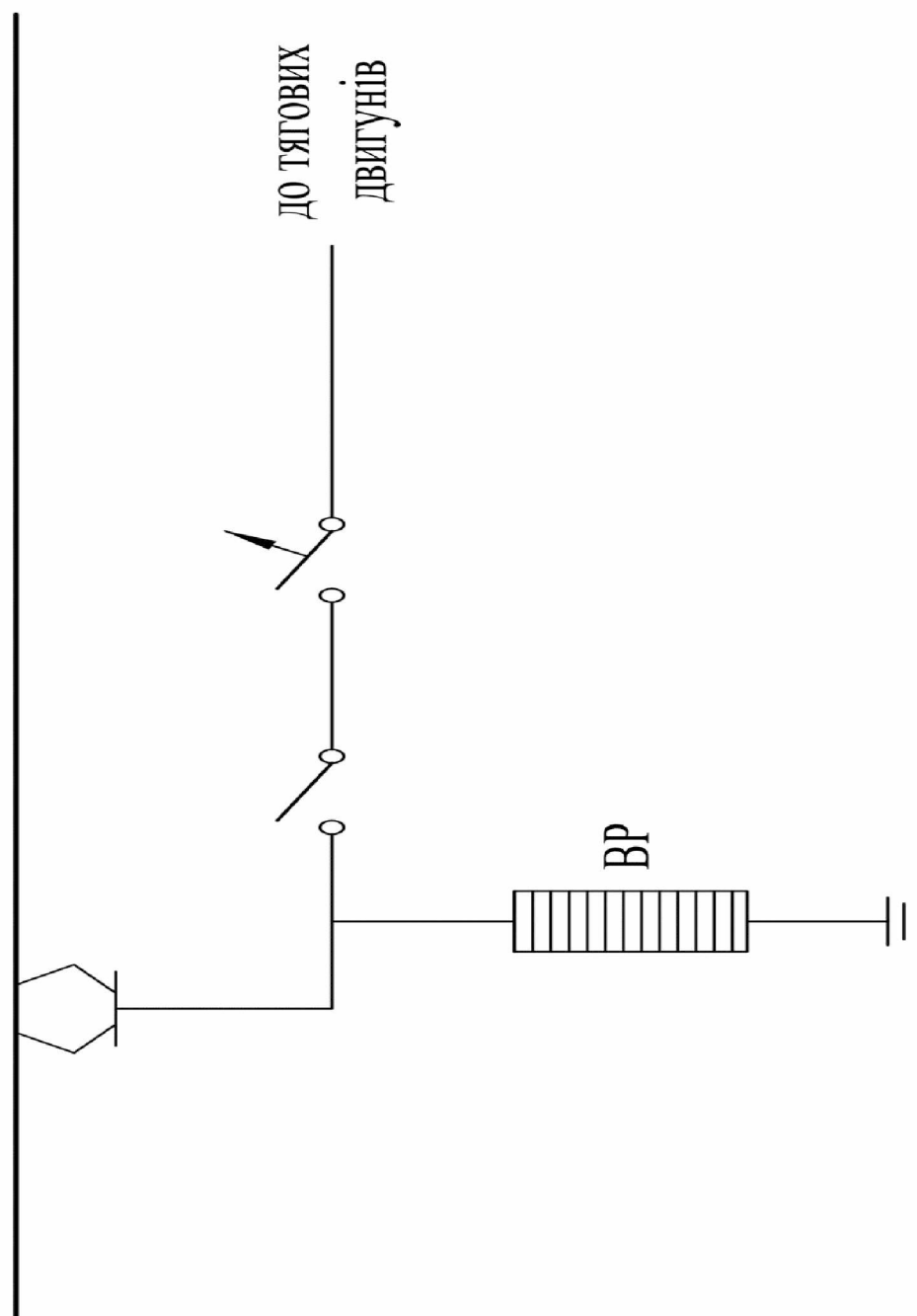


Рис. 2.1. Схема захисту електровозу від атмосферної перенапруги

Для визначення значення комутаційних перенавантажень проводилися експериментальні дослідження, внаслідок яких були встановлені перенапруги, що виникають під час аварійних та операційних режимів на тягових підстанціях і електровозах серії ЕЛ-1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1 які виникають при відключенні високошвидкісного автоматичного вимикача на підстанції тяги

Для визначення перевантажень при перемиканні, спричинених спрацюванням автоматичного вимикача живлення, амплітудний реєстратор перенапруги підключався до робочого підживлення тягової підстанції, який живить контактну мережу відповідно до схеми, наведеної на рис. 2.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1650В

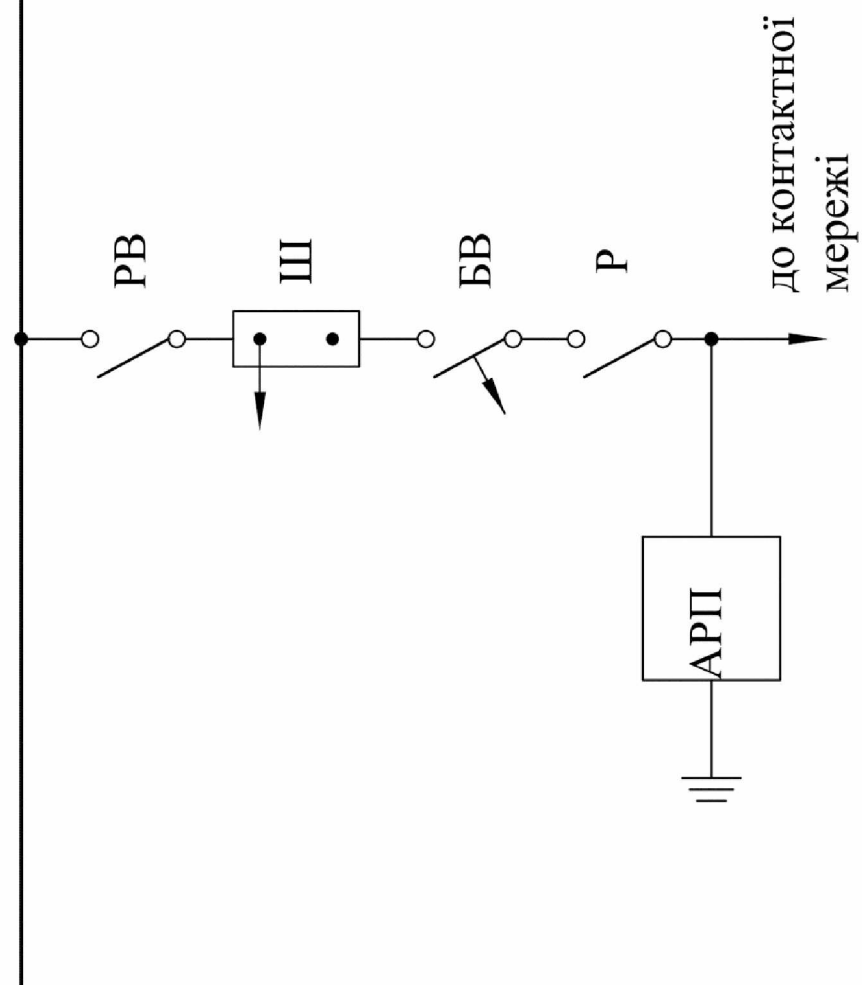


Рис. 2.2. Схема вимірювання перенапруги на тяговій підстанції

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07

Арк.

23

Відключення автоматичного вимикача живлення під навантаженням спричиняє імпульс перенапруги в схемі (рис. 2.2) через самоіндукцію е.д.п.

Значення цієї наднапруги залежить від швидкості спаду струму, індуктивності схеми та низки інших факторів, під час експериментів вона не перевищувала 5,25 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Дослідження режимів внутрішньої перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

Дослідження проводилися на електровозах ЕЛ-1 № 956 та 794 у умовах експлуатації кар'єрного транспорту.

Перенапруги вимірювалися амплітудним реєстратором перенапруги, розробленим політехнічним інститутом, у точках силового контуру електровоза, показаного на рис. 2.3, на секціях ланцюгів із мобільною та постійною контактною мережею.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

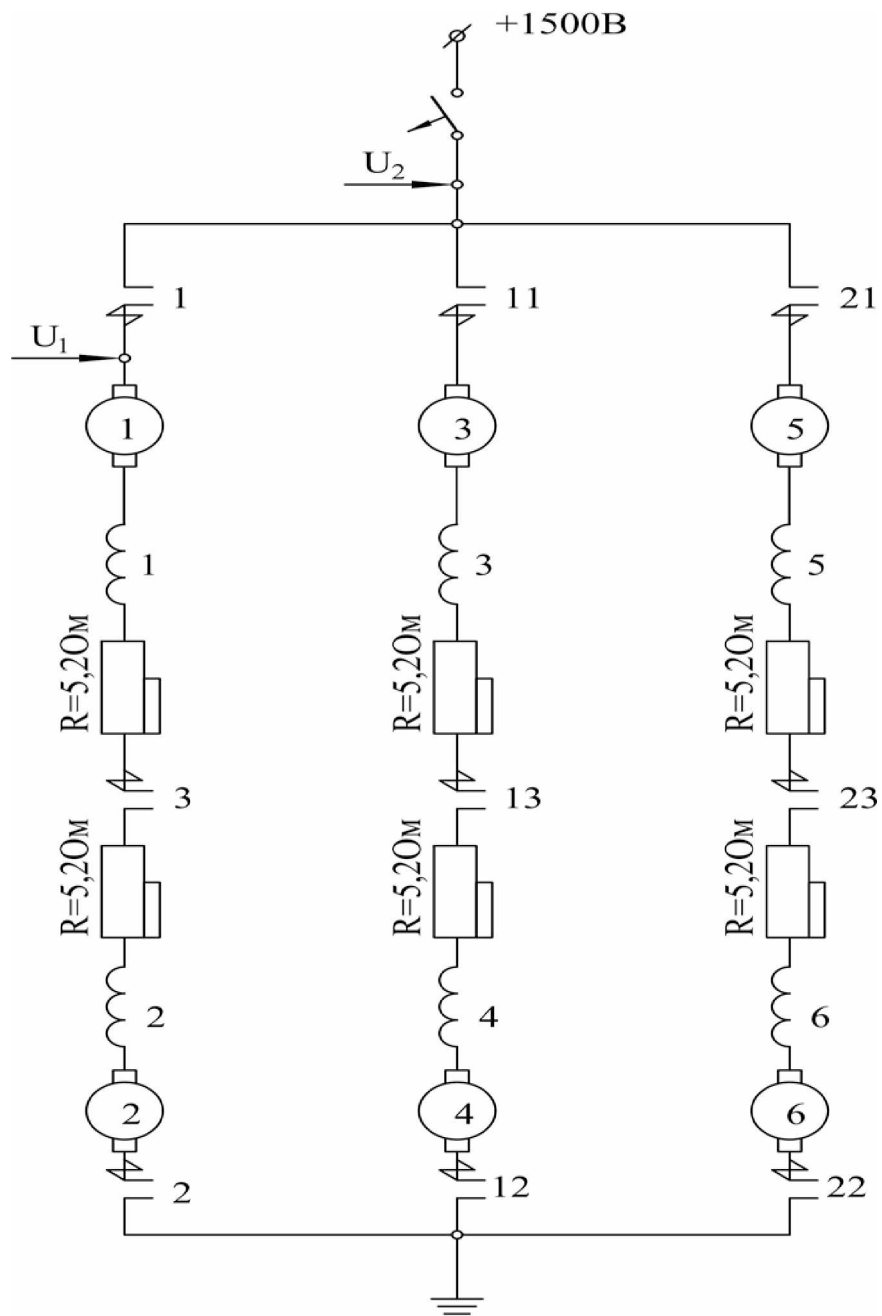


Рис. 2.3. Принципова силова схема електровоза ЕЛ-1 з вимірюванням перенапруги

Розділ 3. Експериментальні дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

3.1. Експериментальні дослідження режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1 у динамічних режимах роботи

Результати досліджень показали, що коли тягові двигуни вимикаються під час запуску електровоза (скидання позицій), на їхніх затискачах у точці виникає імпульс перенапруги, амплітуда якого знаходиться в межах $2,25 \div 3,75$ кВ, коли локомотив стоїть на місці, і зменшується до 2,25 кВ, коли локомотив рухається зі швидкістю 10-20 км/год. U_1

Коли електротяг рухався під навантаженням, реле перевантаження тягового двигуна штучно приводилося в дію, внаслідок чого силовий контур групування тягових двигунів порушувався одним контактором, наприклад, контактором І, ІІ.

$$I_z = 2000a$$

Через спрацьовування перевантажувального реле та високошвидкісного автоматичного вимикача, перевантаження перемикання в точці U_1 змінювалися в межах $2,25 \div 3,75$ кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Коломоєць ДЄ.				Розділ 3	Літ.	Лист
Перевірів	Сінчук І.О.						27
Реценз.							7
Н. Контр.	Сінчук І.О.					КНУ ЕЕМ-23ск	
Затвердив	Пересунько І.І.						

Перемикання перенапруг у силовому ланцюгу електровоза, спричинені скиданням позицій контролера машиніста до 0, можна пояснити наступним чином.

Перемикання в силовому ланцюгу електровоза ЕЛ-1 здійснюється електропневматичними контакторами, які використовують дугові камери з лабіринтовим прорізом.

У контакторах з такими камерами дугове гасіння відбувається в межах 10–13 м/с, залежно від значення струму, який потрібно від'єднати, і кількості тягових двигунів, підключених послідовно.

Різке падіння відключеного струму до нуля пояснює спостережувані перенавантаження в силовому ланцюгу електролокомотива під час зупинки тягових двигунів.

Коли реле перевантаження спрацьовує, ланцюг тягового двигуна розмикається електропневматичними контакторами, тому рівень перенапруги в цьому випадку такий самий, як і під час позицій при скиданні налаштувань.

Хоча високошвидкісний автоматичний вимикач під час експериментів зламав більший струм, ніж електропневматичний контактор, швидкість затухання струму під час дугового гасіння високошвидкісного автомата менша, ніж у контактора, тому перенапруги, спричинені високошвидкісним автоматичним вимикачем, не більші, ніж при від'єднанні електропневматичного контактора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

3.2. Побудова гістограм розподілу стрибків з різними рівнями режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

Найбільші перенапруги в силовому колі електровоза, досягаючи 4500-6000 В, спостерігаються, коли бічний колектор струму від'єднується від контактного дроту під час руху під навантаженням на рухомих коліях. Відокремлення пантографа від контактного дроту відбувається через незадовільний стан мережі мобільного зв'язку.

Такі великі наднапруги виникають у контактній системі через різке падіння до нуля високого струму навантаження тягових двигунів (350-400 А) при використаних опорах реостата старт-гальма.

Крім того, коли колектор струму відривається, при проїзді електровозом через секційний ізолятор зі скиданням навантаження на неповний струм спостерігаються перенапруги 4500–6000 В.

На рисунку 3.1 показано гістограму розподілу стрибків з різними рівнями в силовому ланцюгу електролокомотива в точці (рис. 2.3), яку фіксують лічильники пристрою протягом 10 днів.

На тому ж рисунку затінена частина гістограми показує абсолютну кількість перенапруг із відповідними рівнями, тобто без урахування спрацьовування лічильників нижчих рівнів при активації лічильника з вищим рівнем перенапруги.

З огляду на рис. 3.1 показує, що з 19753 випадків спрацьовування лічильника, у 19622 випадках перенапруги не перевищували 3000 В, а перенапруги 5250÷6000 В спостерігалися лише один раз. U_1 .

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Коли реєстратор перенапруги підключений до точки U_2 , пристрій не фіксує перенавантаження в контактній системі та схемах допоміжних машин, якщо контролер драйвера знаходиться в нульовому положенні.

Для визначення амплітуд наднапруг, що надходять у силовий контур електровоза з контактної мережі, пристрій підключали до точки U_2 (рис. 2.3), і електровоз працював протягом 10 днів. у тих самих умовах, що й у першому експерименті.

Гістограма розподілу стрибків у силовому колі електровоза, коли пристрій підключений до точки U_2 , показана на рис. 3.2.

З огляду на рис. 3.2 показує, що у 99,3% випадків значення перенапруги не перевищують 3750 В, тобто $2,5 U_8$.

Найвищі перенавантаження в силовому колі електровоза, спостерігані під час експериментів, становили $5250 \div 6000$ В.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

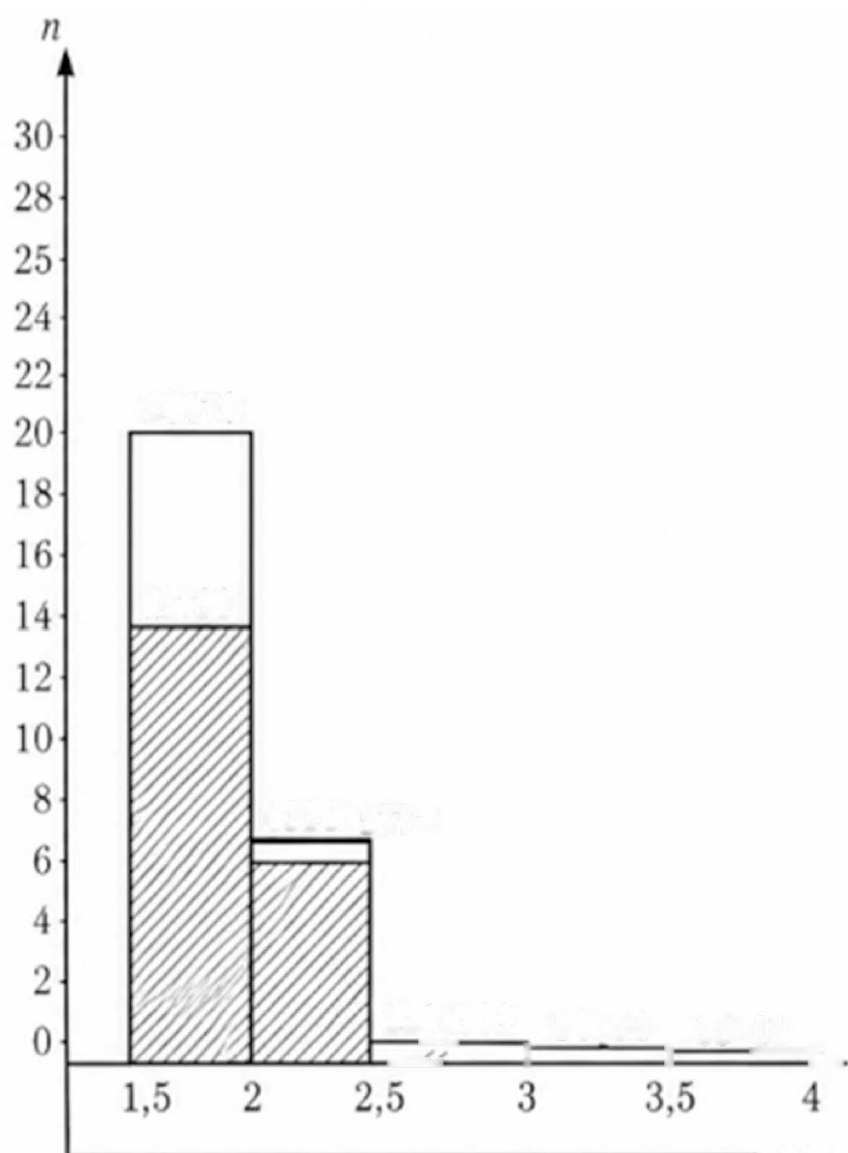


Рис. 3.1. Результати вимірювання перенапруги

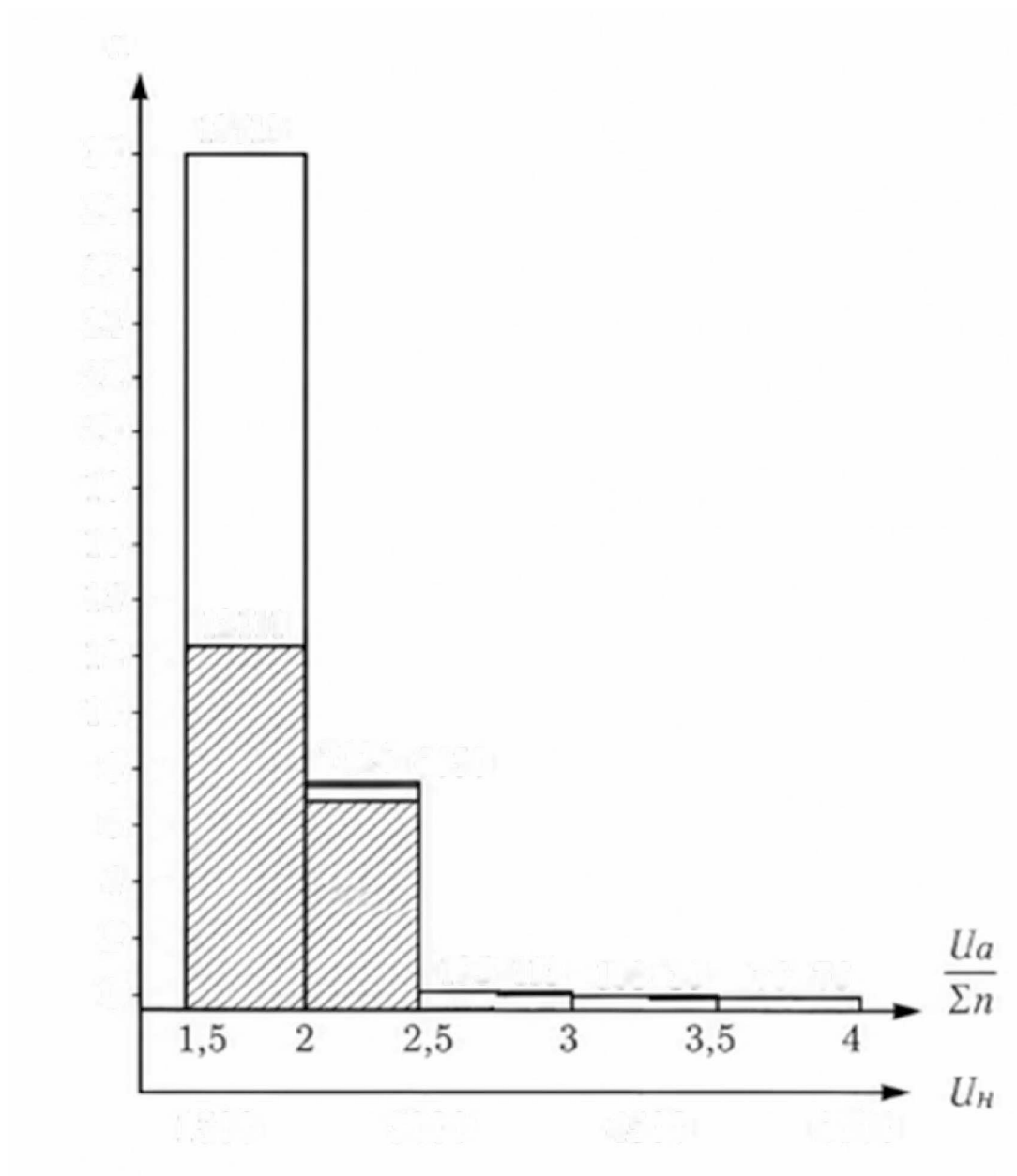


Рис. 3.2. Результати вимірювання перенапруги

3.3. Порівняльний аналіз режимів перенапруги у контактній мережі та силових колах промислового електровозу ЕЛ-1

Порівняння даних на рис. 3.1 і 3.2, ми бачимо, що вони не мають суттєвих відмінностей у кількісних і якісних аспектах.

Це зрозуміло, якщо врахувати, що немає пристроїв з індуктивністю між точками U_2, U_1

При вимірюванні перенапруг у цій точці (рис. 2.3) були випадки, коли лічильники $1,5U_n$ і $2U_n$ спрацьовували при вимкненні мотор-компресорів, коли тягові двигуни не були під навантаженням.

Причину цього явища можна пояснити значною індуктивністю від'єданого кола мотор-компресорів електричний локомотив з незначними амплітудами стрибків.

Коли електровоз стояв на місці з вимкненими тяговими двигунами та допоміжними машинами, іноді спрацьовував лічильник $1,5 U_n$ — це свідчить про натиск незначних амплітуд стрибків від контактної мережі у силовий контур електровоза.

Висновки

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

Здійснити аналіз специфічних умов експлуатації електровоза ЕЛ-1 (наявність верхнього та бічного струмознімання, висока запиленість, робота у глибоких кар'єрах).

Провести класифікацію та статистичний аналіз типів перенапруг (комутаційні, атмосферні, квазістаціонарні), характерних для відкритих гірничих розробок та кар'єрних контактних мереж.

Дослідити фізику виникнення комутаційних перенапруг під час розриву тягових кіл постійного струму з високою індуктивністю (при спрацьовуванні швидкодіючих вимикачів або відриві струмоприймача від контактного проводу).

Дослідити перехідні електромеханічні та електромагнітні процеси, що виникають під час розриву струмів у високоіндуктивних колах тягових двигунів постійного струму електровоза ЕЛ-1.

Розробити математичну модель перехідних процесів для оцінки максимальних амплітуд перенапруг з урахуванням розподілених параметрів тягової мережі.

Оцінити вплив нестабільності струмознімання (відрив струмоприймача від контактного проводу, дугоутворення) на генерацію високочастотних імпульсів перенапруги у бортовій мережі локомотива.

Оцінити вплив атмосферних (грозових) перенапруг на ізоляцію тягових двигунів (ТЕД) та допоміжних машин електровоза.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізувати ефективність штатних засобів захисту (рогових і вентильних розрядників) та обґрунтувати доцільність їх заміни на сучасні нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) на базі оксидно-цинкових варисторів.

Обґрунтувати вибір сучасних нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН) та RC-ланцюгів для заміни застарілих розрядників.

Розробити рекомендації щодо впровадження додаткових RC-ланцюгів (снаберів) для локального придушення комутаційних сплесків безпосередньо на контакторах силової шафи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Pivnyak, G., Volkov, A., & Shirin, L. (2014). Transport in the Mining Industry: Modern Challenges and Innovations. CRC Press.
2. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2018). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance (3rd ed.). Publicis Publishing.
3. Greenwood, A. (1991). Electrical Transients in Power Systems (2nd ed.). John Wiley & Sons.
4. Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press.
5. Das, J. C. (2002). Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics. Marcel Dekker. (Містить розділи щодо моделювання перехідних процесів в індуктивних колах).
6. Chowdhury, A. A., & Koval, D. O. (2009). Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications. IEEE Press/Wiley.
7. Haddad, A., & Warne, D. (Eds.). (2004). Advances in High Voltage Engineering. IET.
8. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
9. Gönen, T. (2014). Electric Power Distribution System Engineering (3rd ed.). CRC Press.
10. Sabiha, N. A., & Lehtonen, M. (2010). Lightning-induced overvoltages transmitted over distribution transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4), 2736-2744.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-07	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Midya, P., Bhowmick, S., & Kumar, P. (2020). Mitigation of power quality issues in AC/DC traction systems using custom power devices: A review. IET Power Electronics, 13(15), 3295-3312.
12. Hinrichsen, V. (2012). Metal-Oxide Surge Arresters in Smart Grid Environments. CIGRE Science & Engineering.
13. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2018). Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Publicis Publishing.
14. Steimel, A. (2012). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrierlag.
15. Chadha, R., & Kumar, R. (2015). Mitigation of switching overvoltages in industrial and mining DC traction systems using metal-oxide varistors. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 68, 230-239.
16. Standard IEC 60099-4:2014. Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems (Applicable principles for DC adaptations).
17. Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., & Thottappillil, R. (2009). Pantograph arcing in electrified railways—Mechanism and influence of various parameters—Part I: With DC traction power supply. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(4), 1931-1939.
18. Popov, M., Acha, E., & Van der Sluis, L. (2006). Fast switching transients in a DC traction system. IEEE Transactions on Power Delivery, 21(3), 1460-1467.
19. Martinez-Velasco, J. A. (Ed.). (2020). Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications. John Wiley & Sons.

20. Mariscotti, A. (2010). Direct measurement of the impedance of the DC railway overhead contact line. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(4), 940-946.

21. Ribeiro, E., & Marques, G. D. (2007). Power quality issues, reliability and filter design in industrial locomotive supply systems. European Power Electronics and Drives Journal, 17(3), 22-31.

22. McInerney, P., & Davies, R. (2011). Reliability and risk analysis of DC traction networks in underground and open-pit operations. Mining Technology, 120(3), 142-151.

23. Hinrichsen, V. (2012). Metal-Oxide Surge Arresters in Smart Grids. Siemens AG.

24. Hasse, P. (2000). Overvoltage Protection of Low Voltage Systems. IET.

25. Wu, T., & Shen, Z. (2018). Simulation of lightning overvoltage on DC transit systems. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 10(2), 25-34.

26. Sidorov, O., & Filippov, V. (2016). Assessment of the pantograph–catenary dynamic interaction taking into account the steady-state wear of the contact wire. Vehicle System Dynamics, 54(1), 58-71.

27. Paul, C. R. (2006). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Схема захисту електровозу від атмосферної перенапруги

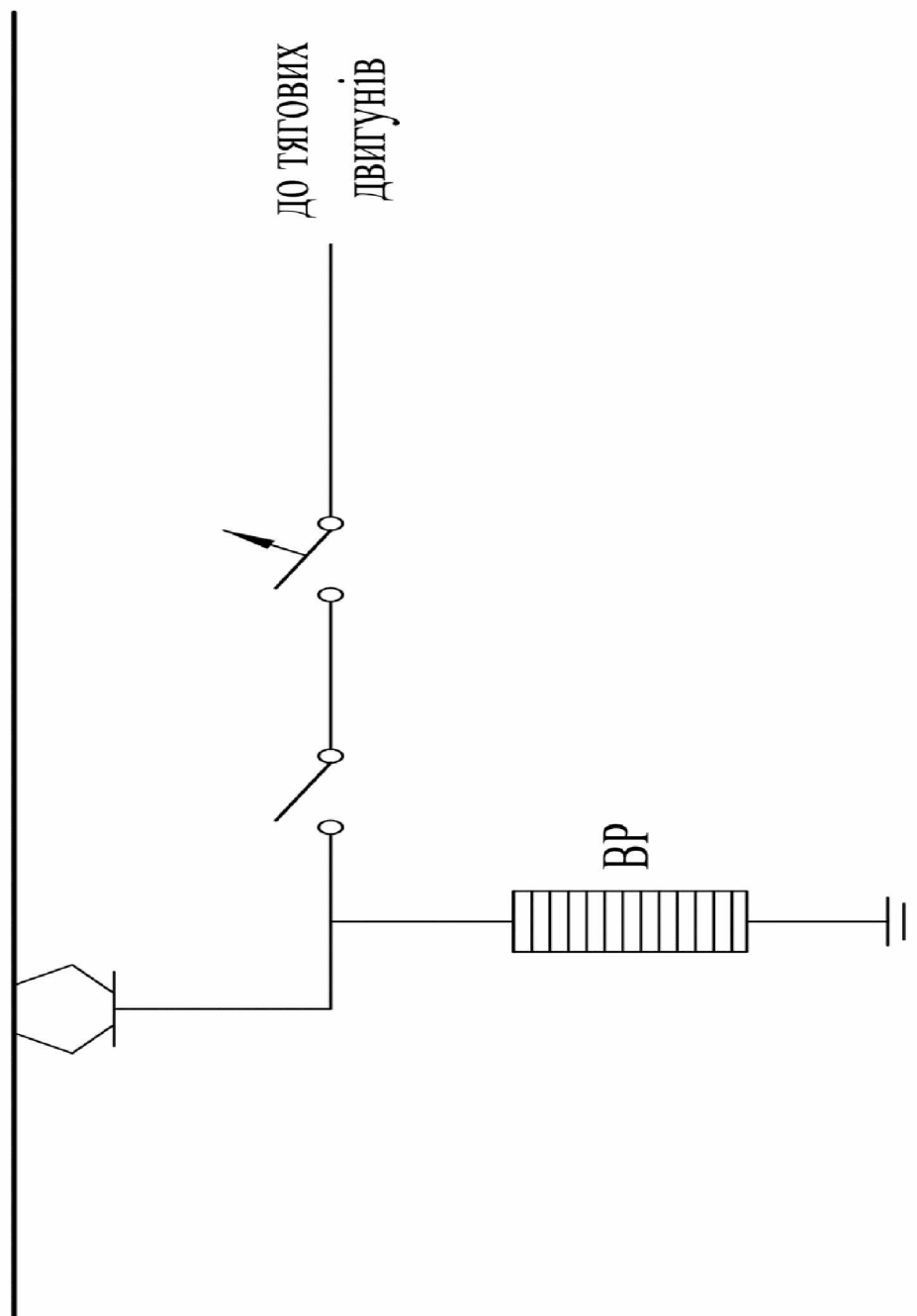
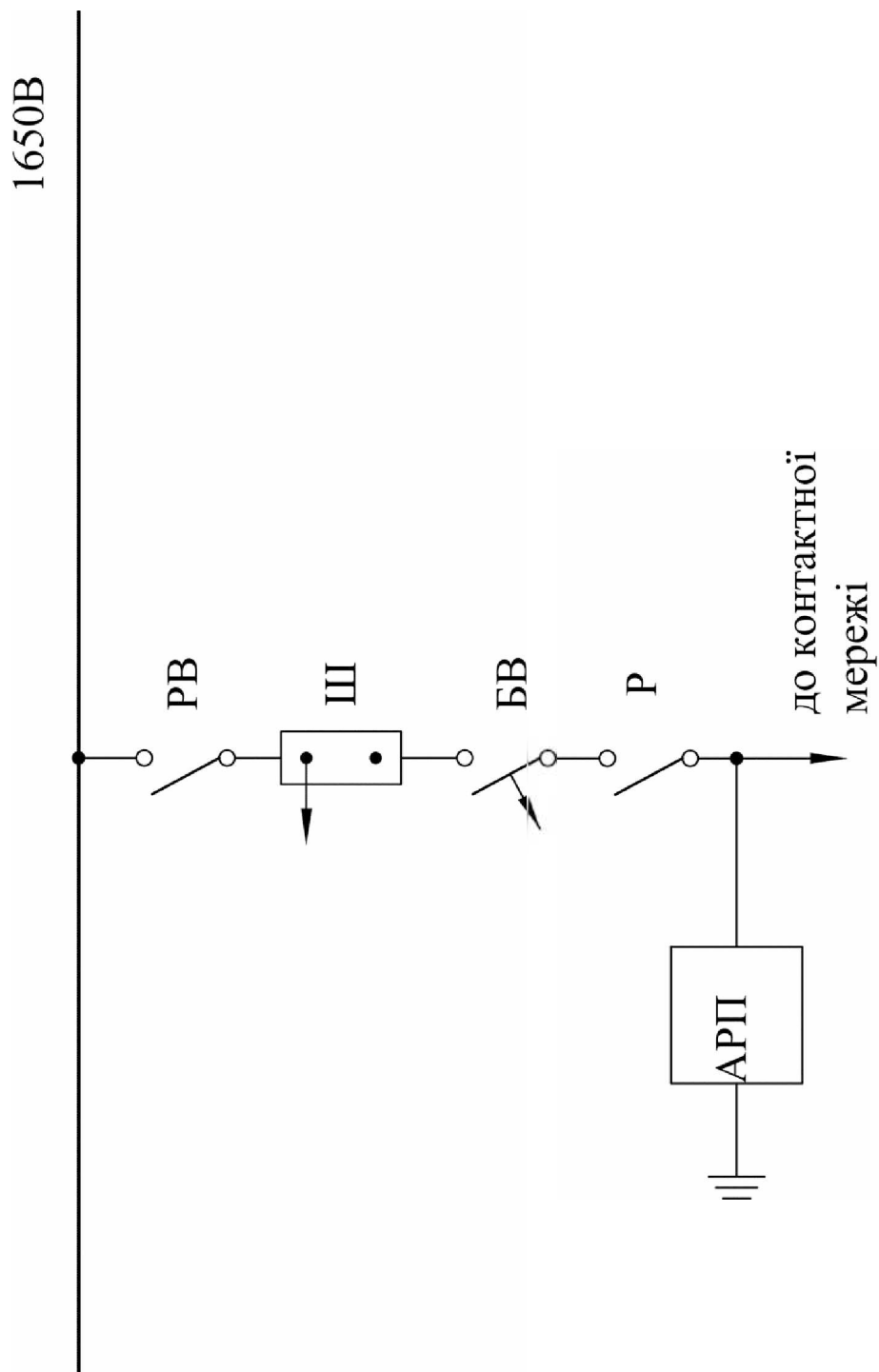
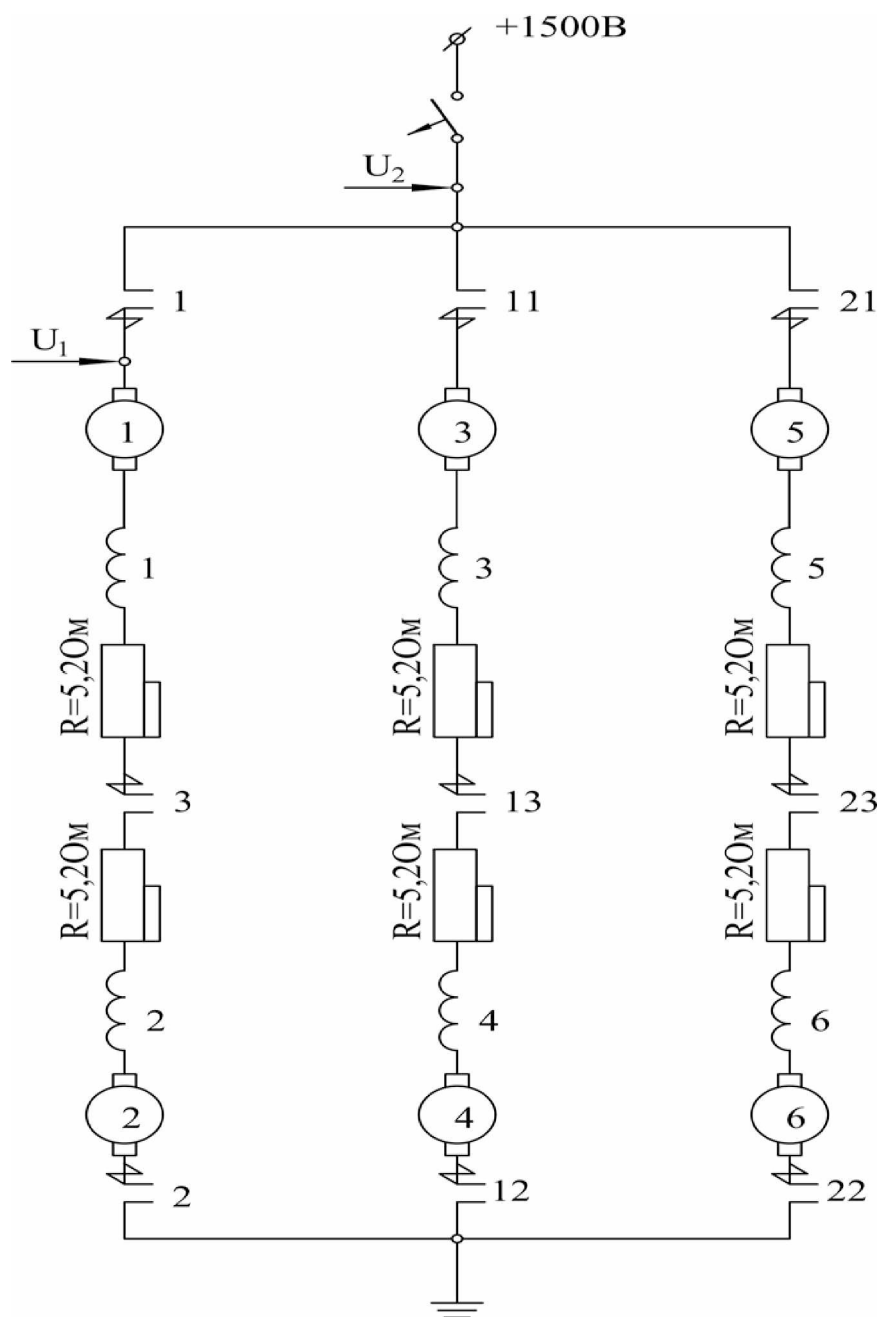


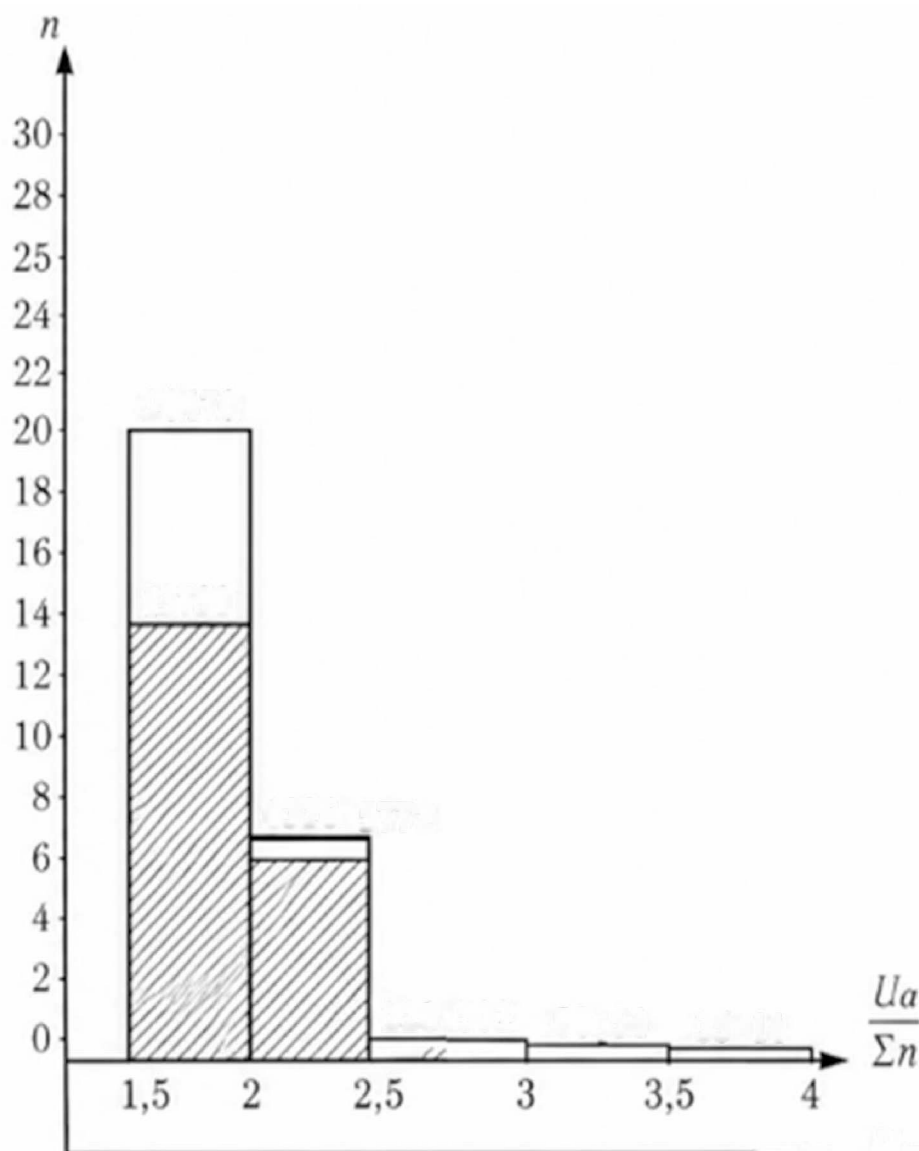
Схема вимірювання перенапруги на тяговій підстанції



Принципова силова схема електровоза ЕЛ-1 з вимірюванням перенапруги



Результати вимірювання перенапруги



Результати вимірювання перенапруги

