

БДР-7

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вишого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струмів витоку на землю в двопровідникових мережах постійного струму за рахунок автоматичного контролю та керування»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Олексій ВЛАСЕНКО
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК

Василь КУТІН

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

« » 2025 р.

Рецензент: Терешкович Л.Б.

(прізвище та ініціали)

«10» 06 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

«03» 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачкафедри

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“ 18 ” 02 2025 року

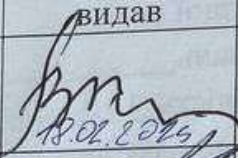
**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Власенку Олексію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струмів витоку на землю в двопровідникових мережах постійного струму за рахунок автоматичного контролю та керування
- Керівник роботи Кутін Василь Михайлович, д.т.н., проф каф.КЕМСК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року №97
- Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.
- Вихідні дані до роботи: кабельні дво провідні мережі постійного струму напругою 220 -500В для живлення промислових споживачів, а також оперативні мережі на електричних станціях і підстанціях напругою 48-220В для живлення засобів автоматики і релейного захисту, двигунів постійного струму власних потреб. В якості джерела живлення застосовують акумуляторні батареї, випрямлячі попередньо заряджені конденсатори. Конденсаторні батареї працюють в режимі постійного підзаряду. Розподільні мережі постійного струму мають засоби захисту від коротких замикань, перевантажень та контроль ізоляції.
- Зміст текстової частини: Вступ. 1 Актуальність проблеми досліджень. 2 Покращення захисної характеристики дво провідної мережі постійного струму. 3 Розробка засобів контролю ізоляції окремих полюсів та захисту від витікання струму. 7 Охорона праці. Висновки
- Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. Аналіз існуючих методів захисту від аварійних режимів роботи та безпечної експлуатації двопровідних мереж. Вдосконалення методу періодичного контролю ізоляції. Теоретичне обґрунтування характеристики захисту від витікання струму на землю. Реалізація пристрою захисту від витікання струму на землю. Висновки по роботі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	д. т. н., проф. каф. КЕМСК Кутін В.М.	 18.02.2025	 06.05.2025
Охорона праці	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 18.02.2025	 20.05.2025

7. Дата видачі завдання 18.02.2025

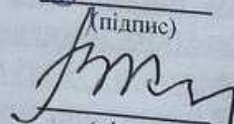
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)	18.02.2025	вик
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	06.05.2025	вик
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2025	вик
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	вик
5	Попередній захист БДР	03.06.2025	вик
6	Нормоконтроль БДР	03.06.2025	вик
7	Рецензування БДР	10.06.2025	вик
8	Захист БДР	20.06.2025	вик

Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Васенко О.М.
(прізвище та ініціали)

Кутін В.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська дипломна робота складається з 115 сторінок формату А4, на яких є 32 рисунків, 15 таблиць, список використаних джерел містить 21 найменування.

Запропоновано діагностичний комплекс, який має покращену (оптимальну) характеристику захисту від витікання струму через шунтувальний зв'язок, що виключає хибні спрацювання захисту, підвищує рівень надійності, безпеки та ефективності експлуатації розподільних мереж промислових підприємств і оперативних мереж електричних станцій та підстанцій. Забезпечує більш точний безперервний і періодичний контроль ізоляції окремих полюсів відносно землі. Безперервний контроль ґрунтується на принципі накладання стороннього гармонічного сигналу частотою 50 Гц, автоматичної компенсації ємності ізоляції полюсів відносно землі і виділення активної складової струму всієї розподільної мережі і окремих її приєднань. Для перевірки точності діагнозу застосовують дублюючий експеримент на основі вдосконаленого методу періодичного контролю ізоляції. Це дозволяє визначити опір ізоляції всієї мережі відносно землі та окремих полюсів. За результатами порівняння отриманих результатів неперервного і періодичного контролю ізоляції роблять висновок про технічний стан ізоляції полюсів відносно землі.

Ключові слова: мережа постійного струму, контроль технічного стану ізоляції, захисне вимикання

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 115 pages of A4 format, on which there are 32 figures, 15 tables, the list of used sources contains 23 names.

A diagnostic complex has been proposed, which has an improved (optimal) characteristic of protection against current leakage through a shunt connection, which eliminates false protection trips, increases the level of reliability, safety and efficiency of operation of distribution networks of industrial enterprises and operational networks of power plants and substations. It provides more accurate continuous and periodic control of the insulation of individual poles relative to the ground. Continuous control is based on the principle of superimposing an extraneous harmonic signal with a frequency of 50 Hz, automatic compensation of the insulation capacitance of the poles relative to the ground and the separation of the active component of the current of the entire distribution network and its individual connections. To check the accuracy of the diagnosis, a duplicate experiment is used based on an improved method of periodic insulation control. This allows determining the insulation resistance of the entire network relative to the ground and individual poles. Based on the results of comparing the obtained results of continuous and periodic insulation control, a conclusion is made about the technical condition of the insulation of the poles relative to the ground.

Keywords: DC network, insulation condition monitoring, protective shutdown

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МСК-модернізація системи контролю

АД-асинхронний двигун

РП -регульований електропривод

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЧРАД – частотно регульований асинхронний двигун

ТПЕ – технічні параметри електродвигуна

ПЧ –АД –перетворювач частоти асинхронного двигуна

ПЧБЗ – перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком

ПЧ – АІ перетворювач частоти з автономним інвертором

АІН – автономний інвертор напруги

АІС – автономний інвертор струму

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	7
1.1. Застосування дво провідних мереж в промисловності та на транспорті.....	7
1.2 Види пошкоджень та ненормальні режими роботи в розподільних мережах постійного струму.....	10
1.3 Аналіз існуючих методів і засобів контролю ізоляції в розподільних мережах постійного струму.....	14
1.4 Дослідження існуючих методів і пристроїв захисного вимикання.....	19
1.5 Висновки по розділу.....	25
2 ПОКРАЩЕННЯ ЗАХИСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВО ПРОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	26
2.1 Теоретичне обґрунтування оптимальної функціональної характеристики пристрою захисту від витікання струму на землю в дво провідній мережі постійного струму.....	26
2.2 Реалізація оптимальної функціональної характеристики пристрою від витікання струму.....	31
2.3 Вдосконалення методів для визначення опору ізоляції полюса мережі відносно землі.....	40
2.4 Висновки по розділу.....	46
3 РОЗРОБКА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ ОКРЕМИХ ПОЛЮСІВ ТА ЗАХИСТУ ВІД ВИТІКАННЯ СТРУМУ.....	48
3.1 Розробка пристрою для періодичного контролю ізоляції дво провідних мереж постійного струму.....	48
3.2 Технічна характеристика та алгоритм функціонування пристрою захисного вимикання в мережах постійного струму.....	53
3.3 Методика розрахунку ефективності захисного вимикання, інформаційно – вимірювальної підсистеми контролю ізоляції та пошуку пошкоджень в розподільних мережах постійного струму.....	69
3.5 Висновки по розділу.....	71
7 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	73

ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
ДОДАТКИ.....	89
ДОДАТОК А (обов'язковий) Технічне завдання.....	89
ДОДАТОК Б Ілюстративна частина.....	94
ДОДАТОК В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	110

ВСТУП

Актуальність теми. Для забезпечення споживачів постійною напругою в промислових об'єктах, а також в оперативних колах на електростанціях і підстанціях, застосовуються розподільчі двопровідні мережі постійного струму (РМПС) з робочою напругою від 24 до 500 В. Практичне використання таких мереж показало, що найпоширенішим видом пошкоджень у них є однополюсне замикання на землю, яке становить понад 80% від усіх несправностей. Подібні ушкодження можуть спричинити міжфазні короткі замикання, пожежі, вибухи, ураження електричним струмом, зупинку виробничого обладнання, а також некоректну або невизначену роботу релейного захисту та автоматичних пристроїв на об'єктах енергетики [1,2,3,4].

Чинна система технічного обслуговування та ремонту (СТОР) базується на регламентованому підході та використовує методи періодичної діагностики. Наявні засоби контролю витоку струму мають різний ступінь чутливості до змін провідності ізоляції щодо землі та не здатні реагувати на симетричне зниження опору ізоляції, що сприяє накопиченню прихованих дефектів [5,6,7,8]. Хоча системи захисного відключення РМПС на підприємствах відповідають діючим вимогам електробезпеки, вони мають схильність до "перезахисту" — помилкових відключень, які порушують роботу високопродуктивного обладнання.

Недосконалість оцінки технічного стану ізоляції полюсів щодо землі як в системах постійного, так і в періодичного контролю, разом із неточною роботою захисного відключення, знижує ефективність технічного обслуговування РМПС. Для підвищення надійності експлуатації необхідно удосконалити методи виявлення прихованих дефектів ізоляції через точний моніторинг опору полюсів щодо землі та струмів витоку з використанням шунтуючих каналів.

Таким чином, розробка і впровадження оптимізованих засобів захисту від струмів витоку на землю, а також покращення систем безперервного та періодичного контролю ізоляції в оперативних мережах електростанцій і підстанцій, є актуальним прикладним завданням. Це сприятиме зменшенню кількості хибних спрацювань, подовженню терміну безвідмовної роботи пристроїв захисту, скороченню втрат електроенергії та підвищенню надійності енергопостачання.

Метою роботи є оптимізація захисної характеристики пристроїв контролю струмів витоку передбачає підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів щодо землі. Це досягається шляхом мінімізації впливу ємнісної складової мережі та визначення величини струму, що протікає через місце витоку на землю. Такий підхід сприяє підвищенню рівня надійності, безпеки та ефективності функціонування двопровідних мереж постійного струму.

Об'єкт дослідження – процес зміни технічного стану ізоляції полюсів відносно землі в дво провідних мережах постійного струму.

Предмет дослідження – методи та засоби контролю ізоляції в дво провідних мережах постійного струму.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)».

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальна характеристика розподільних мереж постійного струму

У промисловості та агропромисловому секторі двопровідні мережі постійного струму (РМПС) використовуються для контролю стану ізоляції та забезпечення захисту від струмів витоку. На електростанціях і підстанціях РМПС виконують функції оперативних мереж, що забезпечують живлення систем автоматики, релейного захисту, а також електродвигунів невеликої потужності.

РМПС на цих об'єктах включає джерела живлення та розподільчу мережу, від якої живляться споживачі з робочими напругами 24, 36, 110, 220 та 380 В. Відповідно до Правил технічної експлуатації, оперативний струм постійної напруги використовується на всіх електростанціях, а також на підстанціях класу напруги 110–750 кВ із кількістю вимикачів більше трьох, а також на всіх підстанціях, де встановлені елегазові або повітряні вимикачі, синхронні компенсатори чи трансформатори з примусовою системою охолодження.

Для забезпечення живлення постійним струмом на електростанціях та великих підстанціях зазвичай застосовують свинцево-кислотні акумуляторні батареї типу СК, які мають поверхнево-додатні та коробчасті від'ємні пластини.

На електростанціях споживачами оперативного постійного струму є кола керування, автоматика, системи сигналізації, аварійне освітлення, а також критично важливі механізми власних потреб, що забезпечують підтримання працездатного стану обладнання. До них належать, зокрема, мастильні насоси, системи ущільнення валів та регулювання турбогенераторів.

Характер навантаження на джерела оперативного постійного струму

змінюється в залежності від умов експлуатації, тому умовно його поділяють на постійно увімкнене та короткочасне. До споживачів, які працюють безперервно, належать елементи керування, блокувальні пристрої, релейний захист, частина аварійного освітлення та системи сигналізації. Короткочасно увімкнені споживачі — це, як правило, ті, що працюють на змінній напрузі, зокрема в аварійних ситуаціях. Тривалість навантаження в таких випадках визначається тривалістю аварійного режиму: для станцій, підключених до енергосистеми, вона становить близько 30 хвилин, а для інших — до однієї години.

До категорії короткочасних споживачів, тривалість роботи яких зазвичай не перевищує 5 секунд, належать приводи автоматичних вимикачів і комутаційних апаратів, а також пускові струми, що виникають під час запуску пристроїв керування, блокування, сигналізації та елементів релейного захисту [5, 9, 10].

У системах розподілу постійного струму для підключення таких споживачів зазвичай застосовують багатожильні контрольні кабелі з невеликим поперечним перерізом — у межах від 0,75 до 10 мм². Ізоляція таких кабелів виконується з негорючих матеріалів — пластмаси або гуми — з метою забезпечення пожежної безпеки.

На промислових об'єктах для запобігання ураженню людей електричним струмом застосовують пристрої захисту від струмів витоку.

Для живлення електроприводів гірничо-видобувного обладнання, зокрема у вугільних шахтах, широко використовується типова схема з випрямлячем, побудованим за трифазною мостовою конфігурацією, яка забезпечує живлення двигунів постійного струму транспортних машин, таких як самохідні вагони [11, 12].

Основним споживачем електроенергії в екскаваторі є головний електродвигун, номінальна потужність якого зазвичай становить від 250 до

2500 кВт і більше. Цей двигун обертає три генератори постійного струму, які забезпечують живлення виконавчих електродвигунів механізмів екскаватора — підйому, натиску, обертання та переміщення — з напругою 330–660 В постійного струму.

У деяких випадках використовуються системи на базі генераторно-двигунного агрегату з тиристорним збудженням або керованого перетворювача, який живить електродвигуни. Електроживлення обмоток збудження синхронного двигуна, двигунів механізмів, а також керувальних кіл подається від тримашинного перетворювача, який включає асинхронний двигун та два генератори постійного струму з напругою 80–85 В.

У вугільній та гірничорудній промисловості живлення електроприводів постійного струму може здійснюватися як від генераторів, так і від різноманітних перетворювальних пристроїв, що працюють за різними схемами випрямлення. Через це, навіть за однакових параметрів ізоляції, струми витоку можуть значно відрізнятися залежно від конкретної схеми живлення.

На промислових підприємствах для подачі електроенергії до електродвигунів постійного струму часто використовуються неізольовані токопроводи, зокрема тролейні лінії, які встановлюються на пересувному обладнанні та механізмах. В окремих випадках застосовуються шлангові токопроводи, що переміщуються разом з машинами, наприклад кранами або тельферами. Широке поширення мають відкриті провідники великого перерізу — профільні або масивні мідні чи сталеві, а також комплектні шинопроводи тролейного типу.

У сфері міського електротранспорту застосовуються стандартизовані рівні напруги: для трамваїв і тролейбусів — 550 В; на шинах тягових підстанцій — 600 В; для метрополітенів — 750 В на борту рухомого складу і 825 В на виході з тягової підстанції. На підстанціях невеликої потужності зазвичай використовується одна секціонована шина постійного струму, тоді

як на більш потужних — впроваджуються двошинні ізольовані системи, які підключаються до контактних проводів.

Для забезпечення живленням кіл релейного захисту, дистанційного керування, сигналізації, електромагнітних приводів і високошвидкісних автоматичних пристроїв на тягових підстанціях передбачено використання акумуляторних батарей у поєднанні з напівпровідниковими випрямлячами.

Розподільчі мережі постійного струму (РМПС) знаходять широке застосування на підприємствах коксохімічної промисловості. Тут вони використовуються для живлення електроприводів зважувальних вагонеток, зондових лебідок, систем заливання води в скипові пристрої, а також самоочищувальних електромагнітних фільтрів.

1.2 Види пошкоджень та ненормальні режими роботи розподільних мережах постійного струму

Під несправністю зазвичай розуміють певну модель фізичного дефекту в електронному або електричному пристрої (ОД). Як правило, кожен тип несправності можна охарактеризувати як зміну параметрів або порушення зв'язків між елементами електричної схеми пристрою. Наприклад, типовими допустимими моделями несправностей є обриви ланцюгів, короткі замикання, вихід коефіцієнта підсилення підсилювача за встановлені межі, а також фіксоване значення логічного "1" або "0" на виході цифрового компонента.

Модель несправності визначається як складом елементної бази релейного захисту (РЗ), так і типом обраної моделі. Зокрема, у випадку РЗ, побудованого на основі резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів та інших аналогових компонентів, типові несправності включають обриви чи короткі замикання резистивних і ємнісних елементів, пробої та закорочення напівпровідникових переходів, а також відхилення електричних параметрів за межі допустимих норм.

У методах тестування мікропроцесорних систем релейного захисту, які використовують функціональні моделі, також враховуються специфічні збої, наприклад, при порушенні роботи механізму вибірки регістрів можливе перенаправлення даних у випадкові регістри замість заданого. А збої в адресації можуть спричинити втрату даних, їхню часову затримку або формування некоректних керувальних сигналів.

Математичне моделювання релейного захисту може бути реалізоване як у явному вигляді — через системи рівнянь чи логічні функції, так і в неявному — наприклад, шляхом опису функціональної поведінки пристрою без повної деталізації внутрішньої структури.

Явна модель релейного захисту (РЗ) складається з формальних описів як справного об'єкта, так і кожної з розглянутих його несправних модифікацій. Для зручності аналізу бажано, щоб усі ці описи були виконані в одній і тій же формі.

Неявна модель РЗ включає один формальний опис справного об'єкта, математичні моделі його фізичних несправностей та правила формування всіх інших описів на основі цих даних. Зазвичай у такій моделі спочатку задається математичний опис справного об'єкта, за яким можна згенерувати моделі різних несправностей.

Основні вимоги до моделей як справного об'єкта, так і несправностей полягають у тому, що вони мають з достатньою точністю відображати характеристики об'єкта та його дефектів. У неявних моделях діагностованих об'єктів моделі несправностей повинні бути сумісні з існуючим описом об'єкта, що дозволяє ефективно формувати інші необхідні описи.

Об'єкт, справний чи несправний, може розглядатися як динамічна система, стан якої у будь-який момент часу t визначається значеннями вхідних, внутрішніх і вихідних змінних. Особливий випадок — коли стан об'єкта не залежить від часу.

Об'єкти, сигнали яких можуть набувати значень із неперервних (континуальних) множин, відносять до класу аналогових (неперервних) систем. Об'єкти, у яких сигнали приймають значення із скінченних множин, а час вимірюється дискретно, класифікують як дискретні. Якщо ж частина контрольованих параметрів має неперервні значення, а інша частина — дискретні, такий об'єкт належить до гібридного, або аналогово-цифрового, класу.

Об'єкти називають комбінаційними або системами без пам'яті, якщо їхні вихідні сигнали залежать виключно від поточних вхідних значень. Натомість послідовними, або системами з пам'яттю, є ті, у яких вихідні значення залежать не лише від входів, а й від часу, тобто мають часову залежність.

Зазвичай розрізняють одиночні та множинні несправності. Одиначна несправність вважається елементарною, тобто такою, яка не може бути розкладена на набір більш дрібних несправностей. Множинна (кратна) несправність — це сукупність двох або більше одночасно існуючих одиничних несправностей.

Несправності поділяються на стійкі та нестійкі. До нестійких належать, зокрема, збій та переміжна відмова.

Відмова (failure-free) — це подія, що означає втрату працездатності об'єкта.

Збій (error) — це відмова, яка зникає сама по собі або усувається незначним втручанням оператора.

Переміжна відмова — багаторазово повторювана самоусувна відмова того ж типу.

Раптова відмова характеризується різким стрибкоподібним зміною одного або декількох параметрів об'єкта.

Поступова відмова виникає внаслідок поступового зміщення значень одного або кількох параметрів об'єкта.

Найпоширенішими несправностями є обриви з'єднань та утворення «помилкових» перемичок під час пайки. Такі дефекти практично не залежать від характеристик окремих елементів і призводять до порушення топології електричної схеми. Виявлення та усунення цих дефектів повинні відбуватися на початкових етапах діагностики. Несправності, викликані безпосередньо виходом з ладу окремих елементів, становлять невелику частку від усіх дефектів. Це зумовлено перш за все організацією надійного вхідного контролю комплектуючих виробів релейного захисту та автоматики (РЗА).

Необхідність проведення такого контролю зумовлена тим, що сучасні друковані плати містять велику кількість компонентів. Чим більша кількість елементів, тим вище ймовірність виходу з ладу хоча б одного з них, що може призвести до пошкодження плати. Наприклад, якщо під час виготовлення плати РЗА виконується вибірковий вхідний контроль транзисторів, який забезпечує надходження на збірку не більше 1% дефектних транзисторів, то для блоку з 10 транзисторів ймовірність наявності хоча б одного несправного елемента становитиме 0,1. Це означає, що приблизно 9 з 10 блоків будуть працездатними.

Проте, якщо вузол містить 100 компонентів, то за тих самих умов ймовірність, що плата не матиме жодного несправного пристрою, наближається до нуля. Таким чином, велика кількість компонентів у блоці визначає необхідність ретельного і надійного вхідного контролю.

Зі збільшенням складності ОД різко ростуть витрати на діагностування. Статистичні дані свідчать, що виявлення несправності безпосередньо на друкованій платі обходиться приблизно в 100 разів дешевше, ніж пошук і усунення тієї ж несправності після введення в експлуатацію пристрою, який складається з кількох друкованих плат.

Найбільше опрацьовані питання формування множини припустимих несправностей для ОД, виконуваних на цифрових інтегральних схемах.

Нехай є цифровий елемент, що реалізує функцію $f(x_1, \dots, x_m)$, де m – число входів елементу; $x_1, \dots, x_m$ – входні змінні елементу, що приймають значення 0 чи 1. При i -й несправності елемент реалізує функцію $f_i(x_1, \dots, x_m)$. Будемо говорити, що несправності s_i і s_j елементу помітні, якщо $f_i(x_1, \dots, x_m) \neq f_j(x_1, \dots, x_m)$.

Число помітних функцій від m двійкових аргументів дорівнює $2^{2^{m_i}}$. Отже, число можливих помітних несправностей m – входного цифрового елементу не може перевищувати $2^{2^{m_i}} - 1$, а загальне число одиночних несправностей схеми не може перевищувати

$$L = \sum_{i=1}^k (2^{2^{m_i}} - 1), \quad (1.1)$$

де k – кількість елементів схеми; m_i – кількість входів i -го елементу схеми.

Однак, як правило, число реальних помітних несправностей елементу істотно менше $2^{2^{m_i}} - 1$.

1.3 Аналіз існуючих методів і засобів контролю ізоляції в розподільних мережах постійного струму

Методи контролю ізоляції за принципом роботи можна класифікувати на такі групи: методи, що визначають ступінь асиметрії ізоляції полюсів відносно землі; методи, які застосовують накладення змінного струму низької частоти на РМПС; методи контролю максимальних значень параметрів перехідних процесів; а також комбіновані методи, що поєднують в собі вказані підходи.

Найбільш поширеними та простими у застосуванні є мостові схеми [11, 12, 13]. На рисунку 1.1 показано схему, що контролює зниження рівня ізоляції полюса мережі відносно землі за допомогою двох реле KV1 і KV2. Вимірювання струмів для визначення опорів ізоляції полюсів виконуються через перемикачі SA1 і SA2 за допомогою відповідних рівнянь:

$$R_1 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_2}; \quad R_2 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2)R}{I_1} \quad (1.2)$$

де $R = R_g + R_p$; U_0 – напруга на шинах; I_1, I_2 – струм міліамперметра при розриві кола відповідно перемикачем SA1 та SA2; R_p – опір обмотки реле KV.

Мостові схеми мають низьку точність вимірювання через вплив перехідних процесів, що виникають при почерговому вимиканні кіл за допомогою перемикачів SA1 і SA2.

Для визначення опорів ізоляції R_1 і R_2 необхідно враховувати лише сталу складову системи рівнянь (1.2), тому відлік струму слід виконувати після завершення перехідного процесу, тривалість якого є невизначеною.

Після завершення перехідного процесу граничну відносну похибку, наприклад, визначення опору R_1 за рівняннями (1.2), можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{R_1} = \left| \varepsilon_{U_0} (1 + \alpha_1 (1 + \alpha)) \right| + \left| -\varepsilon_{I_1} \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2} \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_1 \alpha_2^2 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_1^2} \right| + \left| -\varepsilon_{R_g} \frac{\alpha_1 (1 + 2\alpha_1 \alpha_2 (1 + \alpha_2))}{1 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^2 \alpha_2} \right| \quad (1.3)$$

де $\alpha_1 = R/R_1$;

$\alpha_2 = R_1/R_2$;

ε_{U_0} – допустима відносна похибка, зумовлена коливанням напруги мережі постійного струму;

$\varepsilon_{I_1} = \varepsilon_{I_2} = \varepsilon_I$ – гранична відносна похибка вимірювання струму;

ε_{R_g} – заводська гранична відносна похибка опору R_d .

Гранична відносна похибка ε_{R_1} при визначенні R_1 за перехідним значення струму $i_2(t)$ із рівняння (1.4):

$$i_2(t) = \frac{U_0}{R_2 + R(1 + 2R_2/R_1)} \left(1 + \frac{R_2}{R(1 + 2R_2/R_1)} e^{-t/\tau} \right); \quad (1.4)$$

де $\tau = \frac{2CRR_1R_2}{R_1R_2 + R(R_1 + R_2)}$ – стала часу;

C – ємність полюса мережі відносно землі.

$$\varepsilon_{R_1} = \left| \varepsilon_{U_0} \frac{1+\alpha_1(1+\alpha_2)}{1+\alpha_1\alpha_2} \right| + \left| -\varepsilon_{I_2} (1 + \alpha_1\alpha_2)(1 + \alpha_1(1 + \alpha_2)) \right| + \left| \varepsilon_R \frac{1+\alpha_2+\alpha_1\alpha_2(1+\alpha_2)}{(1+\alpha_1\alpha_2)^2} \right|. \quad (1.5)$$

Для реальних умов є прийнятним: $\varepsilon_U = \pm 5\%$, $\varepsilon_I = \pm 2.5\%$, $\varepsilon_R = \pm 5\%$, $\alpha_2 = 0,1 \div 10$. Для схеми широко відомого пристрою УКИ-1, $R=16$ кОм. Аналіз виразів (1.3) та (1.4) показав, що похибка визначення ε_{R_1} може перевищувати 40%.

Застосування принципу накладання напруги високої частоти [5], промислової частоти [7, 8], пониженої частоти [9, 10] або імпульсів різної форми [10] на мережу, а також схема заміщення і розрахункова схема накладання джерела змінної напруги на контрольовану мережу, показані на рис. 1.2, довели, що струм через реагуючий орган можна визначити за формулою [10]:

$$I_{po} = U_{\sim} / \sqrt{Z} \quad (1.6)$$

$$Z = \sqrt{(R_{cx} + R_k / (\omega C^2 R_k^2 + 1))^2 + ((1 + R_k^2 \omega^2 C (C + C_\phi)) / \omega C_\phi (\omega^2 C^2 R_k^2 + 1))^2},$$

де $U_{\sim}$ – діюча величина напруги джерела живлення;

R_k – опір ізоляції та шунтувальних зв'язків в мережі;

R_{cx} – активний опір кола вимірювання струму;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота;

C_ϕ – ємність фільтру приєднання; $C = C_1 + C_2$.

З рівняння (1.6) видно, що чим більша частота джерела напруги, тим суттєвіше впливає ємність мережі на струм. Враховуючи, що загальна ємність мережі може перевищувати 20 мкФ, а ємність одного приєднання — до 4 мкФ на полюс, застосування змінного струму ускладнюється.

Зменшити вплив ємності мережі можна шляхом зниження частоти (наприклад, до 25 Гц, 12,5 Гц або 1–2 Гц), що накладається на контрольовану

мережу, або застосуванням фазочутливих схем, які виділяють активну складову струму в реагуючому органі шляхом компенсації ємнісної складової. Для цього використовують гармонічні сигнали різної форми, амплітудно-модульовані сигнали.

Перераховані методи частково компенсують вплив ємності, але дозволяють контролювати лише загальний опір мережі відносно землі, тоді як потрібно контролювати опір ізоляції кожного полюса відносно землі окремо.

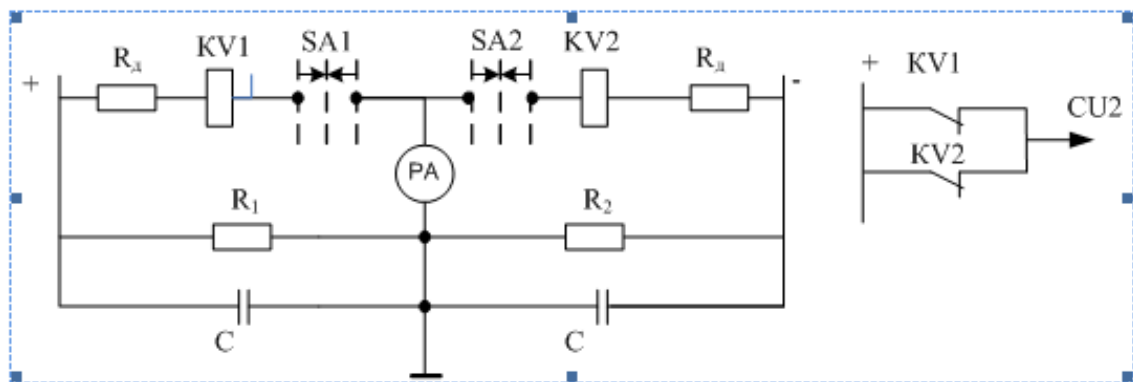


Рисунок 1.1 – Схема заміщення контролю ізоляції мережі постійного струму

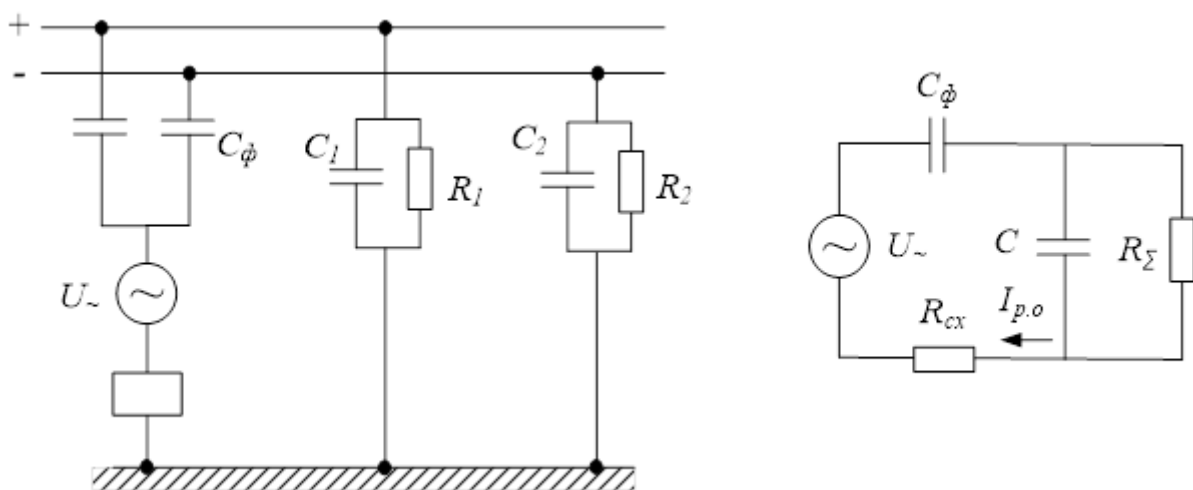


Рисунок 1.2 – Схема: а) заміщення мережі; б) розрахункова схема визначення струму

Серед методів вимірювання омичного опору ізоляції окремих полюсів

найбільше поширення отримали методи, які визначають опір за струмом заряду ємності, підключеної між полюсом мережі та землею.

На рис. 1.3 показано схему, де параметри ізоляції полюсів визначають за допомогою омметра логометричного типу PR. Для цього перемикач SA встановлюють у положення 1 або 2 та натискають кнопку SB, конденсатор C_0 через струмову обмотку логометра PR заряджається. Обмотка напруги логометра під'єднана на напругу U_0 мережі постійного струму. За відхиленням стрілки логометра можна визначити омичний опір полюсів R_1 або R_2 . Розряд ємності C_0 здійснюють через опір R . При положенні перемикача SA у положенні 1 або 2 та натисканні кнопки SB перехідний струм через конденсатор C_0 визначатиметься за законом заряджання (розрядження) ємності і може бути поданий у вигляді функції часу $i(t)$ $i(t)$ $i(t)$:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{R_2(1+2C/C_0)^2} e^{-\tau t}; \quad (1.7)$$

$$i_2(t) = \frac{U_0}{R_1(1+2C/C_0)^2} e^{-\tau t}, \quad (1.8)$$

де $\tau = \frac{R_1+R_2}{R_1R_2(C_0+2C)}$ - стала часу перехідного процесу.

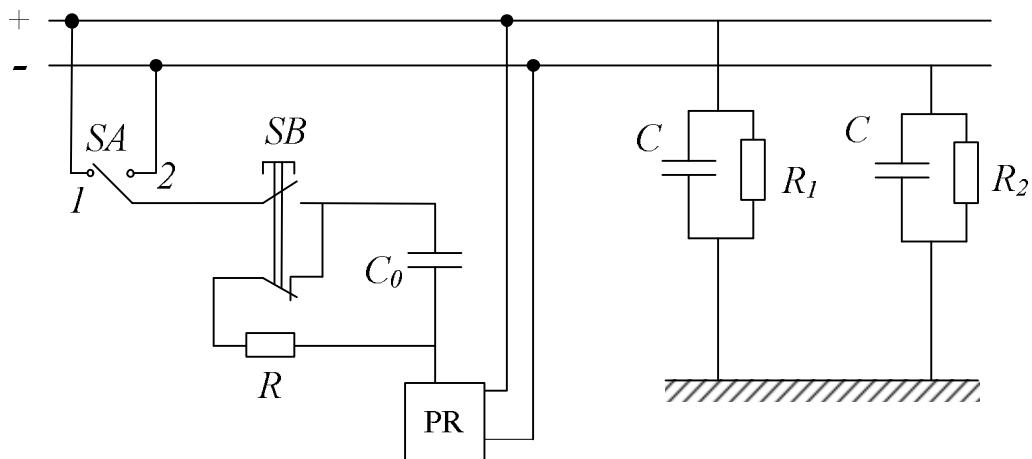


Рисунок 1.3 – Схема заміщення пристрою для вимірювання омичного опору полюсів мережі постійного струму відносно землі

Струму $i(0)$, буде при $t = 0$ мати максимальне значення. Тоді з рівнянь (1.19), (1.20) отримаємо:

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)(1+2C/C_0)^2}; \quad \dots \quad (1.9)$$

$$R_1 = \frac{U_0}{i_2(0)(1+2C/C_0)^2}. \quad (1.10)$$

Величини C_0 не є обмеженою, а тому методична похибка буде мінімальною і впливом ємності в мережі можна знехтувати.

Цей метод можна застосовувати лише для періодичного контролю ізоляції.

1.4 Дослідження існуючих методів і засобів захисного вимикання

Для безпечної роботи двопровідної мережі постійного струму відповідно до правил безпеки використовують такі основні заходи: захисне вимикання, заземлення та контроль ізоляції. Пристрій захисного вимикання (ПЗВ) автоматично відключає електроустановку у випадку, якщо людина торкається струмоведучих частин або виникає шунтовий зв'язок із струмом витоку на землю, що перевищує допустимі значення. Захисне заземлення служить для зниження напруги дотику, яка може з'явитися через пошкодження ізоляції на металевих деталях обладнання, що зазвичай не перебувають під напругою. Контроль ізоляції відповідає за підтримання опору ізоляції полюсів релейно-механічної постійної системи (РМПС) відносно землі в межах безпечних норм.

У таблиці 1.1 наведені нормативні значення напруги дотику та струму, що проходить через тіло людини у випадках небезпечного контакту. У нормальному режимі напруга дотику складає 8 В, а струм – 1,0 мА. Під небезпечним режимом роботи електроустановки розуміють стан несправного обладнання, коли можуть виникати умови, що призводять до ураження електричним струмом людей, які взаємодіють із цією установкою. У таблиці наведено гранично допустимі величини напруги та струмів для струмового

шляху від однієї руки до іншої, а також від руки до ніг.

Таблиця 1.1 – Найбільш допустимі напруги дотику $U_{д.т}$ і струми I_h , що протікають через тіло людини у разі небезпечного режиму роботи електроустановки постійного струму

Рід струму	Нормована величина	Тривалість дії, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Понад 1,0
Постійний	$U_{д.т}, В$ $I_h, мА$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
Випрямлений двопівперіодний	$U_{д.т}, В$ $I_h, мА$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	-
Випрямлений однопівперіодний	$U_{д.т}, В$ $I_h, мА$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	60	150	15

Надійність роботи мостових схем як пристроїв для безперервного контролю ізоляції, а саме пристроїв захисного вимикання (ПЗВ), забезпечується тоді, коли фактична крива залежності опору кола витoku струму, при якому відбувається відключення джерела, співпадає з теоретичною захисною характеристикою. Точність дотримання цієї умови визначається співвідношенням між величинами струмів, що протікають через вимірювальний орган, і у зоні виникнення шунтового замикання. Мінімізація кількості необґрунтованих відключень досягається при тому, що на всьому діапазоні зміни опору ізоляції полюсів відношення величин струмів

$$k = I_B / I_{p.o.} = \text{const}, \quad (1.11)$$

$I_{p.o.}$ - струм, який протікає через реагуючий елемент пристрою захисного вимкнення (ПЗВ);

I_B - струм у точці витікання, що не перевищує допустимий рівень згідно з вимогами електробезпеки.

Аналіз мостової схеми показав, що співвідношення цих струмів можна визначити як:

$$k = \frac{I_B}{I_{p.o.}} = \frac{R_1(R_g + R_2)}{R_g(R_2 - R_1) + R_1 R_2}. \quad (1.12)$$

В граничному випадку за умовами електробезпеки, коли $R_1 = R_2 = R_i$

$$k = \frac{I_B}{I_{p.o.}} = \frac{R_g + R_i}{R_i} = \frac{R_{i*+1}}{R_{i*}}, \quad (1.13)$$

де $R_{i*} = R_i / R_g$.

Із рівнянь (1.12), (1.13) видно, що умова (1.11) не виконується.

При накладенні змінного струму на контрольовану мережу струм через реагуючий орган визначається за формулою (1.17). Проведемо аналіз фактичної характеристики захисту цих пристроїв та порівняємо її з необхідною захисною характеристикою згідно з вимогами електробезпеки. Для спрощення дослідження приймемо, що внутрішній опір реагуючого органу можна не враховувати $R_{p.o.}$, а ємність ізоляції полюсів мережі відносно землі будемо вважати $C=0$, а фільтра приєднання $C_\phi \rightarrow \infty$. Тоді вираз (1.14) має вигляд

$$I_{p.o.} = \frac{U_{\sim}}{R_{\Sigma}} = \frac{U_{\sim} [R_h + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)]}{R_1 R_2 R_h / (R_1 + R_2)}, \quad (1.14)$$

де R_h - опір шунтувального зв'язку між полюсом і землею (опір тіла людини відносно землі).

Скористаємося умовою (1.11), тоді для випадку коли $R_1 = R_2 = R_{i3}$

$$k_{\sim} = \frac{I_B}{I_{p.o.}} = E_0 R_{h*} \frac{R_{i3}}{R_{\sim}}, \quad (1.15)$$

де $R_{h*} = \frac{R_h}{R_{доп}}$; $R_{i3} = \frac{R_{i3}}{R_{доп}}$ - відносні величини; $R_{доп} = 6$ кОм (ГОСТ 12.1.038-82).

З рівняння (1.15) видно, що умова (1.11) не виконується, оскільки пристрій захисту реагує на сумарний активний опір полюсів мережі відносно землі і тому може виникати зона хибного спрацювання захисту в межах можливих значень загального опору мережі відносно землі. В реальних умовах ємність полюсів мережі відносно землі $C \gg 0$, тому щоб знизити

вплив ємності мережі, частоту джерела живлення, що накладається на мережу, зменшують до 25 Гц [8,9], 12,5 Гц або 1–2 Гц [10]. Проте навіть у цьому випадку фактична захисна характеристика перевищує необхідну на всьому реальному діапазоні змін омичного опору, що призводить до хибних відмов. Найбільш удосконаленим є пристрій захисного вимкнення [15], який базується на принципі накладання оперативного змінного струму промислової частоти на контрольовану мережу з автоматичною компенсацією ємності мережі відносно землі, вимірюванні струму через опір полюсів відносно землі та порівнянні його з еталонним значенням. Принципова схема ПЗВ типу УЗО наведена на рис. 1.4 [15]. Змінний оперативний струм з першої вторинної обмотки проміжного трансформатора TL через випрямляч VD2 подається на ізоляцію полюсів мережі через ємнісний фільтр C0 між полюсами мережі та землею. Струм у виконавчому органі (реле KL) пропорційний загальному опору полюсів мережі відносно землі. Вимірювання ємності мережі полюсів відносно землі здійснюється за допомогою LC-генератора, який живиться від VD3, виконаного на одному транзисторі з ємнісно-активним зворотним зв'язком, а на виході має підсилювач П. В схемі (рис. 1.4) ємність полюсів мережі відносно землі C через фільтр приєднання C₀, конденсатор C₂ та додаткову індуктивність W_д приєднується паралельно активному опору зворотного зв'язку генератора LC. Напруга, знята з активного опору зворотного зв'язку, підсилюється і подається на обмотку керування W_к дроселя L_{др}, індуктивність якого змінюється залежно від ємності мережі. Обмотка W_{др} [15] складається з двох секцій, розташованих на крайніх стержнях Ш-подібного осердя дроселя, підключених зустрічно для компенсації змінної ЕРС в обмотці керування. Змінюючи струм в обмотці керування, можна регулювати індуктивність дроселя. При налаштуванні параметрів дроселя L_{др} у резонанс з ємністю мережі відносно землі струм у реагуючому органі буде мінімальним і визначатиметься виключно активним опором мережі відносно землі.

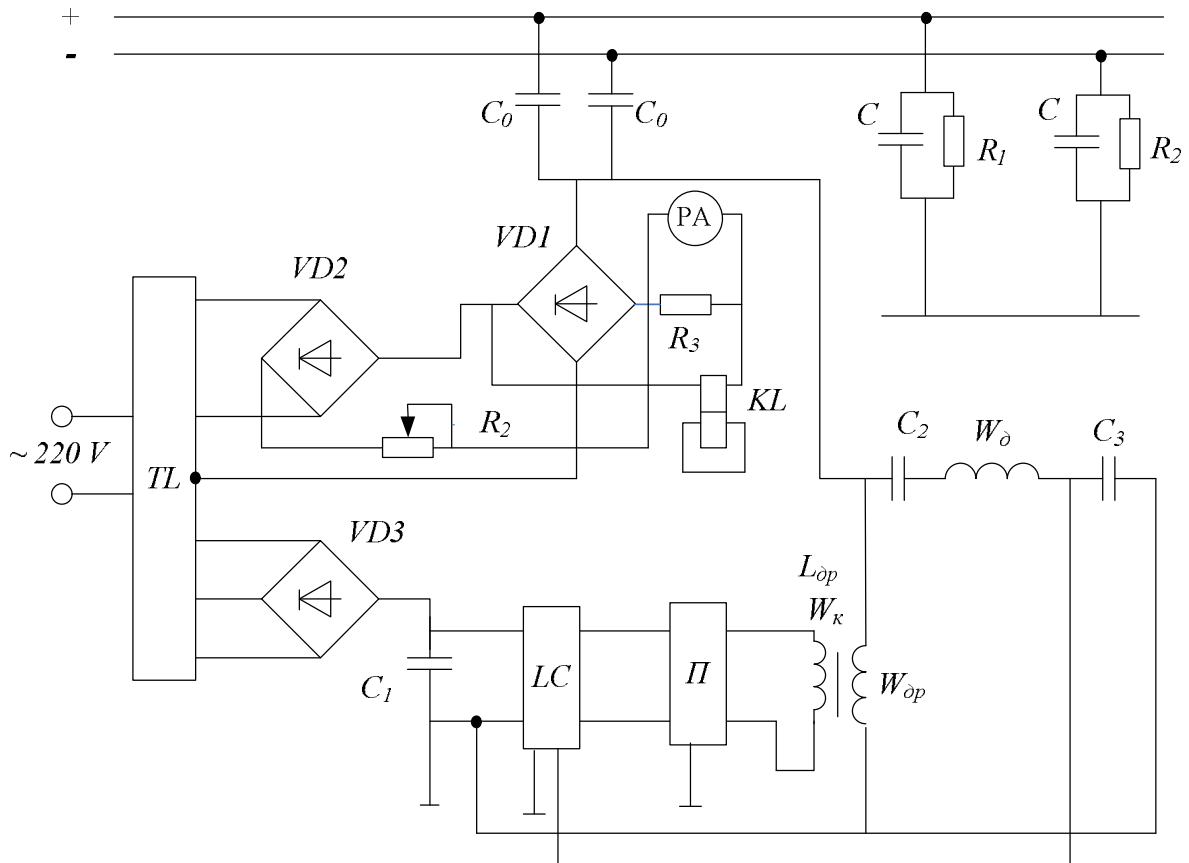


Рисунок 1.4 – Принципова схема УЗО

Для ліквідації залишкового струму в обмотці реле KL, викликаного втратами в дроселі через діоди випрямляча VD1, через випрямляч VD2 пропускається струм, який регулюється резистором R2. Це забезпечує відкривання всіх діодів моста VD1, і струм у реле визначатиметься різницею між струмом у першій обмотці трансформатора TL та струмом, що проходить через діод у зворотному напрямку. Короткозамкнута обмотка застосовується для зменшення впливу перехідних процесів.

Якщо припустити повну компенсацію ємності мережі і нехтувати ємністю фільтра підключення C0, то струм у вимірювальному органі буде дорівнювати

$$I_{\text{в.о.}} = U_{\sim} \cdot \sqrt{1/R_{\text{із}}^2 + (2\omega C - k_{\text{LC}}/\omega L_{\text{др}})^2} \quad (1.16)$$

де $U_{\sim}$ - напруга змінного струму, що накладається на мережу (друга обмотка

TL),

$R_{із}$ - загальний активний опір ізоляції полюсів мережі відносно землі;

$L_{др}$ - індуктивність дроселя;

k_{LC} - коефіцієнт перетворення генератора LC.

Якщо має місце резонансне явище налагодження, то $2\omega C = k_{LC}/\omega L_{др}$ і пристрій здійснює безперервний моніторинг загального активного опору полюсів мережі по відношенню до землі. Уставка спрацювання ПЗВ [15] вибирається як:

$$R_{із} = 0,25 \cdot \frac{U_0}{I_{hдоп}}, \quad (1.17)$$

де U_0 - напруга джерела постійного струму;

$I_{hдоп}$ - допустимий струм через тіло людини при часі його дії $t \geq 1$ с. При такій уставці спрацювання реле забезпечується безпека роботи мережі, проте вона виявляється надмірною і призводить до необґрунтованих відключень обладнання у всьому реальному діапазоні зміни опору ізоляції полюсів мережі відносно землі.

Для усунення цього недоліку було запропоновано комбінований метод контролю струму витікання при дотику людини до струмоведучих частин обладнання [6]. Доведено, що стабільне значення струму, що проходить через тіло людини, може бути описане рівнянням

$$I_h = i_h(0) \cdot \frac{R_{із}}{R'_{із}}, \quad (1.18)$$

де $i_h(0)$ - максимальне значення струму через тіло людини при $t=0$;

$R'_{із}, R_{із}$ - активний опір ізоляції полюсів мережі відносно землі до моменту дотику людини (до виникнення шунтувального зв'язку) та після його утворення.

Недолік цього методу полягає у складності узгодження захисної характеристики перехідного процесу.

1.5 Висновок по розділу

Аналіз вищезазначених питань дозволяє виокремити основні завдання для дослідження покращення характеристик спрацьовування захисту від струмів витоку у двопровідних мережах постійного струму:

1. Обґрунтування актуальності теми дослідження.
2. Огляд сфер застосування двопровідних мереж у промисловості та транспорті.
3. Характеристика пошкоджень та аномальних режимів роботи в розподільних мережах постійного струму.
4. Аналіз існуючих методів і засобів контролю ізоляції у розподільних мережах постійного струму.
5. Огляд та дослідження існуючих методів і пристроїв для захисного вимкнення.
6. Теоретичне обґрунтування оптимальної функціональної характеристики пристрою захисного вимикання (ПЗВ).
7. Реалізація та впровадження оптимальної функціональної характеристики ПЗВ.
8. Забезпечення селективності дії захисного пристрою.
9. Розробка системи безперервного контролю ізоляції та захисту від ураження електричним струмом у двопровідній мережі постійного струму.
10. Схематичне представлення пристрою, що захищає людину від ураження електричним струмом.
11. Оцінка економічної ефективності запропонованих рішень.

2 ПОКРАЩЕННЯ ЗАХИСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Теоретичне обґрунтування оптимальної функціональної характеристики пристрою захисту від витікання струму на землю в дво-провідній мережі постійного струму

У системах постійного струму основним критерієм для оцінки справності ізоляції є гарантування безпеки для обслуговуючого персоналу. У випадку аварійних ситуацій рівні дотику до напруги та сила струму не мають перевищувати нормативи, встановлені стандартом ГОСТ 12.1.038-82. Згідно з вимогами щодо проєктування електричних установок, двопровідні мережі постійного струму мають бути обладнані засобами контролю ізоляційного стану, пристроями захисного вимкнення та системами захисного заземлення. [3, 4, 6]

Регулярний та безперервний контроль стану ізоляції дає змогу підтримувати високий рівень ізоляційного опору між полюсами мережі та землею, виявляючи і своєчасно усуваючи пошкоджені ділянки. Система захисного заземлення допомагає зменшити потенційну напругу дотику, яка може виникнути при пошкодженні ізоляції на струмоненесучих металевих частинах електроустановок, що за нормальних умов перебувають без напруги. Пристрої захисту від струму витіку на землю призначені для автоматичного відключення обладнання у разі дотику людини до одного з полюсів мережі або при утворенні шунтуючого замикання, коли величина струму витіку перевищує допустимі значення. Ефективність застосування окремих захисних засобів досліджувалась у ряді наукових праць [5, 13, 15, 16].

Проведемо оцінку стану ізоляції у двопровідній постійнострумовій мережі без врахування конкретних типів захисту, ґрунтуючись виключно на вимогах безпеки, визначених стандартом ГОСТ 12.1.038-82.

Аналогічно до попереднього випадку, двопровідну мережу постійного струму розглядатимемо як систему, що виконує перетворення вхідного сигналу у вихідний. Вхідним параметром у цьому випадку приймається напруга $U_0 = \text{const}$ джерела постійного струму, а вихідним сигналом – струм що проходить через тіло людини, розглядатиметься як результат утворення шунтуючого замикання. Враховуючи, що гранична ситуація відповідає контакту людини з певним опором R_h , тоді [5], струм через тіло людини може бути визначений як

$$i_h(t) = \frac{U_0 R_1}{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)} \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_h (R_1 + R_2)} \exp \left[- \frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{2 C_1 R_1 R_2 R_h} t \right] \right), \quad (2.1)$$

де R_1, R_2 – омичний опір полюсів мережі відносно землі;

C_1, C_2 – ємність полюса мережі відносно землі.

Максимальне значення струму, що проходить через тіло людини, спостерігається у момент початкового контакту, тобто при першій миті дотику $t = 0$

$$i_h(0) = \frac{U_0 R_1}{R_h (R_1 + R_2)}. \quad (2.2)$$

Відомо, що при використанні пристрою захисту від струмів витоку (ПЗВ) тривалість дії електричного струму не обмежується лише сумарним часом спрацьовування самого ПЗВ та комутаційного елемента, який розриває ланцюг живлення. На фактичну тривалість проходження струму також впливає період дії зворотної електрорушійної сили, яка виникає у відключених двигунах постійного струму, підключених до навантаження.

Після відключення мережі від джерела живлення характер зміни струму $i_h(t)$ визначається динамікою спадання зворотної електрорушійної сили, що генерується обертовими електродвигунами постійного струму. Найдовший період дії зворотної е.р.с. спостерігається в режимі холостого

ходу, тобто за відсутності навантаження [19]. На часову постійну спадання цієї зворотної е.р.с. впливає також метод, який застосовується для гасіння магнітного поля двигуна. Оскільки у практиці використовуються різноманітні типи систем електроприводів постійного струму, визначити конкретне значення максимальної або середньої тривалості дії зворотної е.р.с. без аналізу конкретної схеми електроприводу неможливо.

Для узагальнення аналізу розглянемо випадок, коли вимикання мережі здійснюється пристроєм захисту від струмів витоку (ПЗВ) у поєднанні з фідерним автоматичним вимикачем, встановленим після джерела живлення, а гасіння магнітного поля електродвигуна при цьому не передбачено. Визначивши момент інерції J через маховий момент GD^2 , кутову швидкість через кількість обертів у хвилину, а електромагнітний обертаючий момент $M_{\text{э}}$ через витрати потужності P_1 з початковою кількістю обертів n_0 перед вимиканням двигуна, маємо перетворене рівняння руху

$$GD^2 \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{dn}{dt} = -\frac{P_1}{n_0} \quad (2.3)$$

або

$$T_{\text{в.д}} dn = -n_0 dt, \quad (2.4)$$

де $T_{\text{в.д}} = \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \frac{GD^2 n_0^2}{P_1}$ – постійна часу вибігу електродвигуна.

Інтегруючи рівняння (2.4) в межах n_0 до n , для проміжку часу від 0 до t отримаємо

$$e = K_{\text{е}} n_0 \Phi_{\text{в}} \left(1 - \frac{t}{T_{\text{в.д}}} \right). \quad (2.5)$$

Із виразу (2.5) видно, що зворотна е.р.с. в разі самогальмування вимкненого двигуна постійного струму без гасіння його поля для випадку $M_c = \text{const}$, змінюється за лінійним законом.

З урахуванням (2.44), (2.5) максимальна величина струму через тіло людини після вимкнення мережі

$$i_h(0) = \frac{eR_1}{R_h(R_1 + R_2)} = \frac{K_e \Phi_B n_0 \left(1 - \frac{t}{T_{в.д}}\right) R_1}{R_h(R_1 + R_2)}. \quad (2.6)$$

Часова постійна $T_{в.д}$ залежить від конструктивних особливостей елементів навантаження, що взаємодіють з обертовим двигуном, типу самого двигуна, а також від втрат на тертя та ряду інших чинників. Вона може значно варіюватися, інколи досягаючи десятків секунд. У зв'язку з цим можна стверджувати, що протягом періоду спрацьовування ПЗВ і комутаційного апарата $t_{відк}$, величина струму, що проходить через людину, практично не зменшується і залишається близькою до максимальної.

$$i_h(0) = i_{h\text{доп}} = \frac{U_0 R_1}{R_h(R_1 + R_2)}, \quad (2.7)$$

де $i_{h\text{доп}}$ – граничнодопустимий струм через тіло людини коли час дії $t = t_{відк}$, який визначається ГОСТ 12.1038-82.

В сталому режимі

$$I_h = I_{h\text{доп}} = \frac{U_0 R_1}{R_1 R_2 + R_h(R_1 + R_2)}, \quad (2.8)$$

де $I_{h\text{доп}}$ – гранично допустимий струм через тіло людини коли час дії більше 1 с.

Вважаючи, що $i_{h\text{доп}} = m I_{h\text{доп}}$, із рівняння (2.6) можна визначити допустиму величину опору шунтувального зв'язку в перехідному режимі

$$R_{з.від*}^{(п)} \geq \frac{1}{m \left(1 + \frac{R_{2*}}{R_{1*}} \right)}, \quad (2.9)$$

а із рівняння (2.8) для сталого режиму

$$R_{з.від*}^{(с)} \geq \frac{1 - R_{2*}}{1 + \frac{R_{2*}}{R_{1*}}}, \quad (2.10)$$

де $R_{з.від*} = \frac{R_{з.від} I_{\text{ндоп}}}{U_0}$; $R_{1*} = \frac{R_1 I_{\text{ндоп}}}{U_0}$; $R_{2*} = \frac{R_2 I_{\text{ндоп}}}{U_0}$ – відповідно відносні

величини опору замикання та полюсів в мережі відносно землі.

Аналіз рівнянь (2.9) та (2.10) показав, що коли $R_{1*} = \text{const}$ і зміні опору ізоляції від'ємного полюсу в межах $\frac{m-1}{m} \leq R_{2*} \leq \infty$ переважають вимоги до обмеження струму в перехідному режимі і $R_{з.від*}$ визначається за рівнянням (2.9), а коли $0 \leq R_{2*} \leq \frac{m-1}{m}$, переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і $R_{з.від*}$ визначається за рівнянням (2.10), його величина $R_{з.від*} \leq 1$.

У практичних умовах виникає потреба в обмеженні симетричного зниження опору ізоляції між полюсами мережі R_m постійного струму, як з міркувань електробезпеки, так і для запобігання виникненню небезпечного шунтувального замикання на навантаження у двопровідній мережі. З урахуванням того, що найбільш критичною ситуацією вважається дотик людини з мінімальним опором її тіла, відповідне значення якого визначено в ГОСТ 12.1.038-82 як $R_h = R_{\text{допmin}} = 6 \text{ кОм}$, а $R_1 = R_2 = R_m$ і переважають вимоги обмеження струму в сталому режимі із (2.8) можна визначити

$$R_{m*} = 1 - 2R_{\text{доп min}*}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } R_{m*} = \frac{R_m I_{\text{hдоп}}}{U_0};$$

$$R_{\text{доп min}} = \frac{R_{\text{доп min}} I_{\text{hдоп}}}{U_0}.$$

Таким чином, рівняння (2.9) - (2.11) є умовами роботоздатності ізоляції. Відповідно до ГОСТ 12.1038-82 $i_{\text{hдоп}} \leq 200 \text{ мА}$; $I_{\text{hдоп}} \leq 15 \text{ мА}$, тому коефіцієнт m в рівняннях (3.36), (3.38) приймається $m = 13,3$.

Для оперативних мереж постійного струму, які застосовуються на електричних станціях та підстанціях, та у яких пристрої контролю ізоляції лише сигналізують про стан, правила проєктування електроустановок встановлюють такі допустимі межі зниження опору ізоляції одного з полюсів: до 20 кОм для мережі з напругою 220 В, до 10 кОм для 110 В, до 5 кОм для 48 В і до 3 кОм для 24 В. Виконання цих норм є обов'язковою умовою для збереження працездатності ізоляції.

2.2 Реалізація оптимальної функціональної характеристики пристрою від витікання струму

Аналіз рівнянь (2.9) – (2.11) дає можливість сформулювати оптимальну функціональну характеристику (ОФХ) та порівняти її з характеристиками існуючих пристроїв захисту від струму витіку (ПЗВ), розглянутих у розділі 1. Отримані результати свідчать, що незважаючи на загальні недоліки, існуючі ПЗВ мають пороги спрацьовування, що значно перевищують оптимальні значення у всьому діапазоні зміни активного опору ізоляції полюса. Це призводить до надмірного спрацьовування ПЗВ і необґрунтованого відключення діючого обладнання.

Для усунення даного недоліку у сучасних ПЗВ пропонується застосування комбінованого методу контролю струму витіку у випадках дотику людини до струмоведучих частин обладнання [17, 18, 19].

Як показано в 2.1, ОФХ ПЗВ має три ділянки. На першій ділянці $\left(\frac{m-1}{m} \leq R_{2*} < \infty\right)$ переважають вимоги по обмеженню струму через тіло людини в перехідному режимі, тобто імпульсу струму $i_h(0)$. Для цього рекомендується застосовувати метод контролю струму перезаряду, що полягає у додатковому введенні конденсаторів між полюсами мережі та землею. На другій ділянці $\left(0 < R_{2*} < \frac{m-1}{m}\right)$ переважають вимоги до обмеження струму в усталеному режимі. Як буде детально пояснено далі, усталене значення струму, що проходить через тіло людини, може бути виражене у вигляді

$$I_h = i_h(0) \frac{R'_{\text{эh}}}{R_{\text{э}}}, \quad (2.12)$$

де $R_{\text{э}}$, $R'_{\text{эh}}$ – відповідно еквівалентний омичний опір ізоляції полюсів мережі до дотику людини до полюсу мережі та після нього.

Для оцінки струму, що проходить через тіло людини у сталому режимі, рекомендується враховувати його максимальне значення $i_h(0)$ і контролювати активну складову усталеного значення I'_a до дотику людини до полюсу мережі і після дотику I''_a , які оберненопропорційні відповідно опорам $R_{\text{э}}$, $R'_{\text{эh}}$, тобто рівняння (2.12) можна записати як

$$I_h = i_h(0) \frac{I'_a}{I''_a}. \quad (2.13)$$

Для реалізації третьої ділянки оптимальної функціональної характеристики (ОФХ) контролюються величина та ступінь асиметрії ізоляції полюсів мережі.

Еквівалентна схема методу зображена на рисунку 2.1.

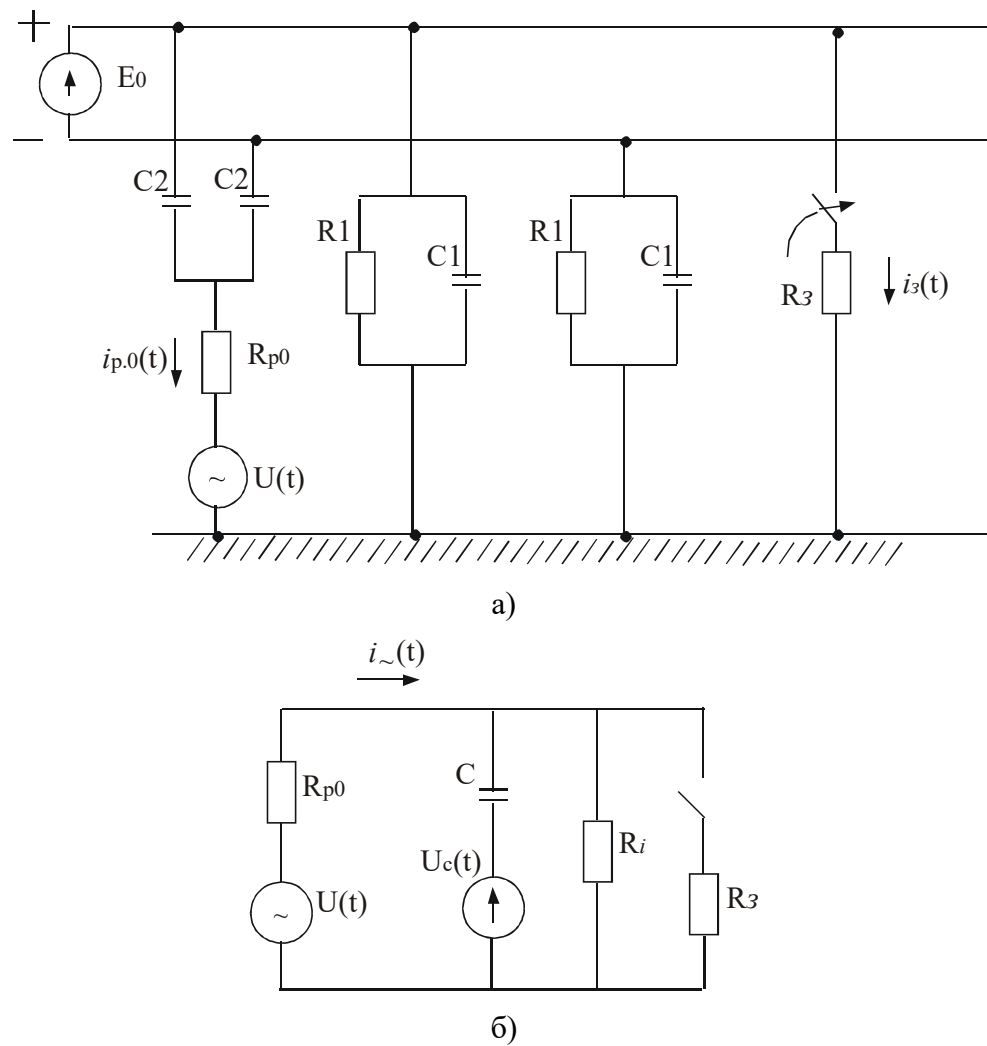


Рисунок 2.1. Заступна схема комбінованого методу контролю струму

витікання: а) розрахункова схема визначення струмів під дією напруги мережі; б) під дією джерела змінного струму

У разі дотику людини до полюса мережі конденсатори $C2$ перезаряджаються, і через орган реагування проходить струм перехідного процесу, що виникає від оперативного постійного струму $i_=(t)$ і змінного $i_{\sim}(t)$. Прийmemo, що орган реагування сконструйований таким чином, що струми завжди сумуються алгебраїчно, тобто

$$i_{p.o.}(t) = |i_=(t)| + |i_{\sim}(t)|. \quad (2.14)$$

Оскільки індуктивність кабелю та джерела струму є незначними порівняно з ємностями C_2 і C_1 , вважатимемо елементи схеми лінійними. Використовуючи метод накладання, спочатку визначимо перехідний струм, що походить від джерела оперативного постійного струму. Для спрощення аналізу можна знехтувати внутрішнім опором органу реагування порівняно з опором тіла людини. Величина струму, що проходить через місце витоку за умови, якщо , може бути розрахована як

$$i_3(t) = \frac{E_0}{2R_3 + R} \left[1 + \frac{R(C_2 + 1,5C_1)}{2R_3(C_1 + C_2)} \exp\left(-\frac{2R_3 + R}{2R_3R(C_2 + C_1)}t\right) \right]. \quad (2.15)$$

Якщо підібрати ємність фільтра $C_2 \gg C_1$, то

$$i_3(t) = \frac{E_0}{2R_3 + R} \left[1 + \frac{R}{2R_3} \exp\left(-\frac{2R_3 + R}{2R_3R(C_2 + C_1)}t\right) \right]. \quad (2.16)$$

Струм в органі реагування

$$i_{p.o.}(t) = \frac{E_0}{2R_3} \exp\left(-\frac{2R_3 + R}{2R_3R(C_2 + C_1)}t\right). \quad (2.17)$$

Коли $R_1 \neq R_2$, то

$$\left. \begin{aligned} i'_{p.o.}(t) &= \frac{E_0 R_1}{R_3(R_1 + R_2)} \exp\left(-\frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{2R_3 R_1 R_2(C_2 + C_1)}t\right) \\ i'_3(t) &= \frac{E_0 R_1}{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2} \left[1 + \frac{R_2 R_1}{R_3(R_1 + R_2)} \exp\left(-\frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{2R_3 R_1 R_2(C_2 + C_1)}t\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

$$i_3(0) = i_{p.o.}(0) = \frac{E_0}{2R_3};$$

Коли $t=0$:

$$i'_3(0) = i'_{p.o.}(0) = \frac{E_0 R_1}{R_3(R_1 + R_2)}.$$

Таким чином:

$$k = i_3(0)/i_{p.o.}(0) = 1$$

і вставка спрацювання $i_{c.p.}$ повинна відстроюватись від короткочасно безпечного струму $i_{к.б.}$

$$i_{c.p.} = i_3(0) \geq i_{к.б.}$$

Із рівняння (2.16) опір ізоляції, коли спрацьовує ПЗВ

$$R_{звід} = \frac{E_0 R_1}{i_{к.б.}(R_1 + R_2)} = \frac{E_0 R_1}{I_{hдоп} m(R_1 + R_2)},$$

оскільки $m = i_{к.б.}/I_{hдоп}$, то у відносних одиницях

$$R_{звід*} = \frac{1}{m(1 + R_{2*}/R_{1*})}. \quad (2.19)$$

Порівняння свідчить, що запропонований метод дає змогу точно відтворити оптимальну функціональну характеристику на ділянці варіювання опору ізоляції

$$(m-1)/m < R_{2*} < \infty.$$

В діапазоні $0 < R_{2*} < \frac{m-1}{m}$ захисна характеристика розташована нижче необхідного рівня, при цьому на симетричне зниження опору ізоляції реакція відсутня взагалі. Цей недолік усувається шляхом введення в контрольовану мережу джерела змінного струму з напругою $U(t) = U_m \sin(\omega t + \phi)$, де ϕ – кут, відповідний моменту виникнення струму витікання.

Визначимо величину струму перехідного процесу, який виникає при дотику людини до позитивного полюса мережі від джерела змінного струму (рис. 2.1.б). Для спрощення аналізу проігноруємо опір конденсаторів C_2 для змінного струму, оскільки їх ємність значно перевищує ємність C_1 ($C_2 \gg C_1$).

$$i_{\sim}(t) = \frac{U_m \sin(\omega t + \phi + \beta)}{\sqrt{\left(\frac{R_{p.o} + R_e + \omega^2 C_1^2 R_{p.o} R_e^2}{1 + \omega^2 C_1^2 R_e^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega C_1 R_e^2}{1 + \omega^2 C_1^2 R_e^2}\right)^2}} + \frac{U_m \sin(\phi - \varphi)}{R_{p.o} \sqrt{\left(1 + \frac{R_{p.o}}{R_i}\right)^2 + R_{p.o}^2 \omega^2 C_1^2}} e^{-t/\tau}, \quad (2.20)$$

де $R_{p.o}$ – опір органу реагування;

$$R_e = R_i R_3 / (R_i + R_3);$$

$$R_i = R_1 R_2 / (R_1 + R_2);$$

$$\varphi = \arctg[R_{p.o} \omega c_1 / (1 + R_{p.o} / R_i)];$$

$$\beta = \arctg[\omega c_1 R_e^2 / (R_{p.o} + R_e + \omega^2 c_1^2 R_{p.o} R_e^2)];$$

$$\tau = R_{p.o} R_e c_1 / (R_{p.o} + R_e).$$

Узгодження захисної характеристики ПЗВ з оптимальною функціональною характеристикою (ОФХ) відповідно до вимог електробезпеки на заданому діапазоні зміни опору ізоляції здійснюватиметься шляхом підбору співвідношення між напругами джерел постійного та змінного струму.

$$\alpha = \frac{U_m}{E_0}, \quad (2.21)$$

а також ємності конденсаторів C_2 .

Визначимо α для найнесприятливішого випадку

$$R_1 \rightarrow \infty; \quad C_1 \rightarrow 0. \quad (2.22)$$

Проведемо дослідження впливу початкової фази на захисну характеристику. Несприятливим є випадок, коли $t = 0$, $\phi = 0$. У початковий момент друга складова рівняння (2.20) дорівнює нулю, і лише при частоті 50 Гц вона досягне максимуму через час $t_1 = 0,005$ с. Водночас перша складова рівняння (2.20) за цей проміжок часу зменшиться. Щоб захисна

характеристика перебувала вище або відповідала необхідній, повинна виконуватися наступна умова:

$$i_{p.o}(t_1) \geq mI_{h_{дон}}, \quad (2.23)$$

тобто

$$\begin{aligned} mI_{h_{дон}} &= \left| \frac{E_0}{R_{p.o} + R_3} \exp\left(-\frac{R_3 + R_2}{2R_3 R_2 C_2} t\right) \right| + \left| \frac{U_m \sin \omega t_1}{R_{p.o} + R_e} \right| = \\ &= \left(\frac{1}{R_{p.o} + R_3} \exp\left(-\frac{R_3 + R_2}{2R_3 R_2 C_2} t\right) + \frac{\alpha}{R_{p.o} + R_e} \right) E_0, \end{aligned}$$

враховуючи те, що $\sin \omega t_1 = 1$

$$\alpha = \left(m - \frac{1}{R_{p.o*} + R_{3*}} \exp\left(-\frac{R_3 + R_2}{2R_3 R_2 C_2} t_1\right) \right) (R_{p.o*} + R_{e*}), \quad (2.24)$$

де $R_{p.o*} = (R_{p.o} I_{h_{дон}}) / E_0$;

$R_{e*} = (R_e \times I_{h_{дон}}) / E_0$.

Для середини ділянки $0 < R_{2*} < \frac{m-1}{m}$, $R_2 = (m-1)/2m$ і в сталому режимі із виразів (2.16), (2.17) та умови (6.24) струм через орган реагування визначимо як

$$i_{p.o}(t) = \left| \frac{E_0}{R_3 + R_2} \exp\left(-\frac{R_3 + R_2}{2R_3 R_2 C_2} t\right) \right| + \left| \frac{U_m \sin(\omega t + \phi)}{R_e + R_{p.o}} \right|. \quad (2.25)$$

Коли $t \rightarrow 0$

$$i_{p.o}(0) = \left| \frac{E_0}{R_3 + R_2} + U_m \sin \phi \left(\frac{R_3 + R_2}{R_3(R_2 + R_{p.o}) + R_2 R_{p.o}} + \frac{R_2}{R_{p.o}(R_2 + R_{p.o})} \right) \right|,$$

якщо виконується умова $i_{p.o}(0) = i_{c.p} = I_{h_{дон}} m$, то із виразу (2.21)

$$m = \frac{1}{R_{3*} + R_{p.o*}} + \alpha \sin \phi \left[\frac{R_{2*} + R_{3*}}{R_{3*}(R_{2*} + R_{p.o*}) + R_{3*}R_{p.o*} + R_{p.o*}(R_{3*} + R_{p.o*})} \right], \quad (2.26)$$

оскільки $R_{3*} = R_{звід*} = \frac{m+1}{m}$, а $R_{2*} = \frac{m-1}{2m}$, то коли $m = 13,3$, $R_{p.o*} = 0,05$, $\sin \phi = 0,5$; із (2.21) $\alpha = 0,179$. Тобто коли $E_0 = 231$ В, треба використовувати джерело змінного струму з амплітудою $U_m = \alpha E = 0,179 \cdot 231 = 41,3$ В

$$I_{h_{дон}} \leq \frac{ER_2}{R_1R_2 + R_3(R_1 + R_2)}$$

і $R_{звід*} \leq \frac{1 - R_{2*}}{1 + (R_{2*}/R_{1*})} = \frac{m+1}{2m}$, то вираз (2.24) можна записати як

$$\alpha = \frac{\left(1 - \frac{2}{m+1} \exp\left(-\frac{2m^2 t_1}{(m^2 - 1)C_{2*}}\right)\right) (4m^2 R_{p.o*} + m^2 - 1)}{4m}, \quad (2.27)$$

де t_1 – час затухання перехідного процесу;

$$C_{2*} = C_2 E_0 / I_{h_{дон}};$$

$$R_3 + R_{p.o} \approx R_3.$$

Отже, при виборі α значення за формулою (2.27) захисна характеристика буде відповідати або перебувати вище оптимальної функціональної характеристики (ОФХ) на її другій ділянці. Щоб оцінити вплив фази коливання змінного струму на коефіцієнт узгодження та захисну характеристику, визначимо величину α у випадку, коли

$$t = 0, \phi = 90^\circ, C_1 = 0, R_{2*} = \frac{m-1}{2m}, R_{звід*} = \frac{m+1}{2m},$$

$$\alpha_1 = \frac{\left(1 - \frac{2}{m+1}\right) (4m^2 R_{p.o*} + m^2 - 1)}{4m}.$$

Відношення цих коефіцієнтів

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{1 - \frac{2}{m+1} \exp\left(-\frac{2m^2 t_1}{(m^2 - 1)C_{2*}}\right)}{1 - \frac{2}{m+1}};$$

для $m = 13,3$; $C_{2\max} = 40$ мкФ; $E_0 = 231$ відношення $\alpha/\alpha_1 = 1,16$.

Отже, навіть у найсуворіших умовах захисна характеристика не перевищує оптимальну більш ніж на 16%.

У випадку симетричного зниження ізоляції через орган реагування проходить струм

$$i_{\sim}(t) = \left| \frac{U_m \sin(\omega t + \phi + \beta)}{Z} \right|,$$

$$\text{де } Z = \sqrt{\left(\frac{R_{p.o} + R'_e + \omega^2 C_1^2 R_{p.o} (R'_e)^2}{1 + \omega^2 C_1^2 (R'_e)^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega C_1 (R'_e)^2}{1 + \omega^2 C_1^2 (R'_e)^2} \right)^2} - \text{повний опір}$$

ланцюга протікання змінного струму;

$$R'_e = R/2, \text{ оскільки } R_1 = R_2 = R.$$

Вимикання мережі, якщо зниження опору ізоляції симетричне повинно відбуватись коли $|i_{\sim}| \geq m \times I_{h_{\text{дон}}}$, тоді

$$Z_{\text{від}} = \frac{U_m}{m I_{h_{\text{дон}}}} = \frac{\alpha E}{m I_{h_{\text{дон}}}}.$$

Для обмеження симетричного зниження опору ізоляції вимикаючий опір повинен відповідати умові, визначеній у рівнянні (2.11). Якщо ємність C_1 дорівнює нулю, через орган реагування проходить мінімальний струм, тоді

$$Z_{\text{від}} = R_{p.o} + \frac{R_{i\text{від}}}{2}$$

і у відносних одиницях

$$R_{i\text{від}^*} = 2(Z_{\text{від}^*} - R_{p.o^*}) = 2\left(\frac{\alpha}{m} - R_{p.o^*}\right),$$

тобто умова виконується, коли

$$2\left(\frac{\alpha}{m} - R_{p.o^*}\right) > 1 - 2R_{\text{доп min}^*},$$

і контроль повного струму не може забезпечити достатньо точну реалізацію другої та третьої ділянки ОФХ.

В зв'язку з цим пропонується контролювати активну складову струму до виникнення замикання I'_a , а максимальне значення струму $i_h(0)$ в момент замикання та активну складову струму I''_a після виникнення замикання в сталому режимі.

Тоді струм через тіло людини в сталому режимі

$$I_h = i_h(0) \frac{I'_a}{I''_a}.$$

Зафіксувавши значення I'_a , $i_h(0)$, I''_a у разі появи замикання за допомогою обчислювального блоку можна визначити струм, що проходить через тіло людини. Порівнюючи його з еталонним значенням $I_{h\text{дон}}$, можна прийняти рішення про спрацьовування ПЗВ на другій ділянці оптимальної функціональної характеристики (ОФХ). Визначення спрацьовування на третій ділянці здійснюється за допомогою I''_a . Тепер похибка реалізації оптимальної функціональної характеристики буде визначатися виключно точністю вимірювальної системи.

2.3 Вдосконалення методів для визначення опору ізоляції полюса мережі відносно землі

Для підвищення точності вимірювань та спрощення визначення опору ізоляції полюса мережі щодо землі пропонується метод [14, 20, 21], який полягає у введенні незарядженого конденсатора з ємністю C між полюсом

мережі та землею та вимірюванні максимальних значень струмів $i_1(0)$, $i_2(0)$ заряду конденсатора, а також напруги між полюсами контрольованої мережі U_0 . За співвідношенням цих параметрів визначаються омичні опори ізоляції R_1 і R_2 відповідних полюсів мережі відносно землі.

Еквівалентна схема методу наведена на рис. 2.2. При припущенні, що опір вимірювального пристрою можна знехтувати, перехідні струми, які виникають при почерговому підключенні незарядженого конденсатора C між позитивним та негативним полюсом мережі, можна розрахувати за формулою

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U_0}{R_2(1 + 2C_1/C)^2} e^{-t/\tau}; \\ i_2(t) &= \frac{U_0}{R_1(1 + 2C_1/C)^2} e^{-t/\tau}, \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

де $\tau = \frac{R_2 R_1 (C + 2C_1)}{R_1 + R_2}$ – постійна часу.

Максимальну величину струм має в перший момент вмикання конденсатора до полюсу мережі, тобто коли $t=0$. Із системи рівнянь (2.28) маємо

$$\left. \begin{aligned} i_1(0) &= \frac{U_0}{R_2(1 + 2C_1/C)^2}; \\ i_2(0) &= \frac{U_0}{R_1(1 + 2C_1/C)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Другий вихід вимірювального пристрою вмикається на напругу контрольованої мережі, тому

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_0}{i_1(0)} &= R_2 \left(1 + \frac{2C_1}{C} \right)^2; \\ \frac{U_0}{i_2(0)} &= R_1 \left(1 + \frac{2C_1}{C} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Звідкіля

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{U_0}{i_2(0) \left(1 + \frac{2C_1}{C}\right)^2}; \\ R_2 &= \frac{U_0}{i_1(0) \left(1 + \frac{2C_1}{C}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Із системи рівнянь (2.31) визначаємо граничну відносну похибку $\varepsilon_{R_1}, \varepsilon_{R_2}$:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{R_1} &= \frac{1}{R_1} \left[\left| \frac{\partial R_1}{\partial U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{\partial R_1}{\partial i_2(0)} di_2(0) \right| + \left| \frac{\partial R_1}{\partial c(0)} dc \right| \right]; \\ \varepsilon_{R_2} &= \frac{1}{R_2} \left[\left| \frac{\partial R_2}{\partial U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{\partial R_2}{\partial i_1(0)} di_1(0) \right| + \left| \frac{\partial R_2}{\partial c(0)} dc \right| \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Після підстановки частинних похідних

$$\varepsilon_{R_1} = \varepsilon_{R_2} = \left| \varepsilon_{U_0} \right| + \left| -\varepsilon_{i_0} \right| + \left| \varepsilon_C \frac{2\alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2} \right|, \quad (2.33)$$

де $\varepsilon_{U_0}, \varepsilon_{i_0}$ – граничні відносні похибки вимірювання відповідно напруги та струму, що визначаються класом точності вимірювальних систем;

ε_C – гранична відносна похибка установлення C ;

$\alpha = 2C_1/C$.

Вибір значення ємності C практично не обмежений. Наприклад, якщо взяти $C = 103$ мкФ, то при максимально можливих ємностях полюсів мережі, що становлять 20 мкФ (типово для оперативних мереж постійного струму на електричних станціях), $\alpha = 0,04$ і похибкою установлення ємності C можна знехтувати.

Отже, похибка методу визначатиметься точністю вимірювальних приладів для струму та напруги.

Для пофазного визначення опору ізоляції пропонується метод підключення джерела постійного струму з протилежною полярністю. Цей метод базується на застосуванні джерела постійного струму з відомим

значенням напруги U_H , джерело підключається між загальною точкою дільника, утвореного двома омічними опорами, і землею. Змінюючи полярність джерела постійного струму, вимірюють струм. Опір ізоляції полюсів мережі відносно землі розраховують за формулою

$$R_{iz} = \frac{2U_H}{\Delta I} - \frac{R_g}{2}, \quad (2.34)$$

де $\Delta I = I_1 - I_2$ – різниця струмів в сталому режимі при різній полярності джерела струму, що вмикається.

Ігноруючи внутрішній опір джерела струму та вимірювальної системи, розрахункову схему методу можна подати у вигляді, показаному на рис. 2.3. Для сталого режиму, застосовуючи метод накладання, визначаємо струми I_1, I_2 . Спочатку будемо вважати, що е.р.с. джерела живлення мережі $E_0 > 0$, а $U_H = 0$, тоді струм через вимірювальний пристрій

$$I_1 = \frac{E_0(R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_g(R_1 + R_2)}. \quad (2.35)$$

В разі вмикання стороннього джерела постійного струму ($E_0 = 0$; $U_H > 0$) до контрольованої мережі струм через вимірювальну систему

$$I' = \pm \frac{U_H}{R_{iz} + \frac{R_g}{2}}, \quad (2.36)$$

де "+" відповідає вмиканню стороннього джерела струму з додатною полярністю, а "-" – від'ємною.

Результуючий струм I_1, I_2 у вимірювальній системі в разі вмикання джерела струму з відповідною полярністю

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E_0(R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_g(R_1 + R_2)} + \frac{U_H}{R_{i3} + \frac{R_g}{2}}; \\ I_2 &= \frac{E_0(R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_g(R_1 + R_2)} - \frac{U_H}{R_{i3} + \frac{R_g}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

Різниця струмів

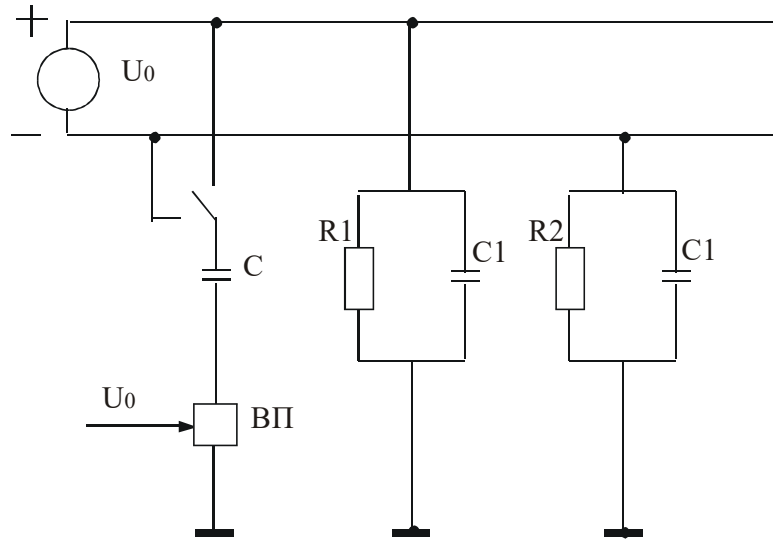


Рис 2.2. Заступна схема пристрою для визначення опору ізоляції полюсів мережі відносно землі

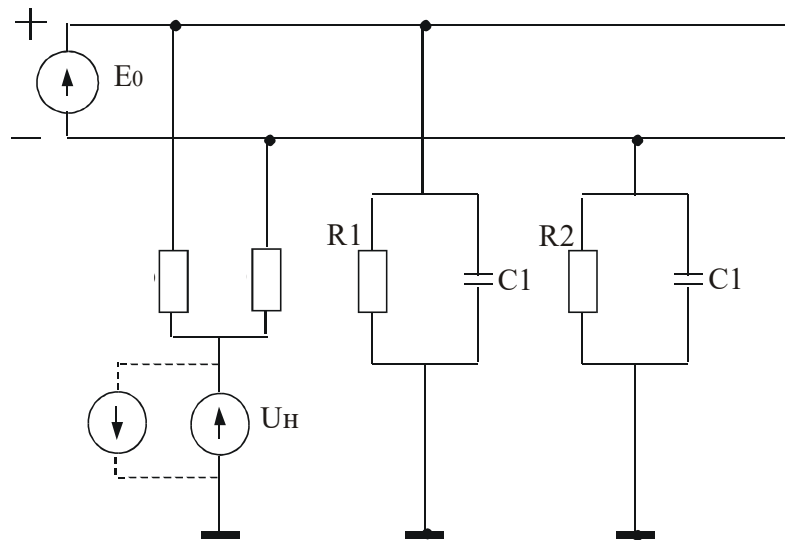


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема методу контролю ізоляції в двопровідній мережі постійного струму

$$\Delta I = I_1 - I_2 = \frac{2U_H}{R_{i3} + \frac{R_g}{2}}. \quad (2.38)$$

Отже, використання цього методу дає змогу усунути вплив ємності мережі та асиметрії опору ізоляції на результати вимірювань.

Метод дозволяє розраховувати опір ізоляції як окремих полюсів, так і в цілому відносно землі. Зокрема, за допомогою рівнянь (2.37) та (2.38) опори ізоляції полюсів можна визначити як

$$R_2 = \frac{2E_0 R_{i3}}{E_0 - I_\Sigma \left(R_{i3} - \frac{R_g}{2} \right)}; \quad (2.39)$$

$$R_1 = \frac{R_{i3} R_2}{R_2 - R_{i3}}, \quad (2.40)$$

де $I_\Sigma = I_1 + I_2$.

Визначимо граничну відносну похибку обчислення R_{i3} , R_1 , R_2 , використовуючи рівняння

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_{i3}} &= \frac{1}{R_{i3}} \left(\left| \frac{\partial R_{i3}}{\partial U_H} dU_H \right| + \left| \frac{\partial R_{i3}}{\partial \Delta I} d\Delta I \right| + \left| \frac{\partial R_{i3}}{\partial R_g} dR_g \right| \right) = \\ &= \left| \left(\varepsilon_{U_H} + 2\varepsilon_i \right) \left(\frac{k_1 + k_2(1+k_1)}{k_1} \right) \right| + \left| \varepsilon_{R_g} \frac{k_2(1+k_1)}{2k_1} \right|, \end{aligned}$$

де ε_{U_H} , ε_i , ε_{R_g} – відповідно відносні похибки вимірювання напруги, струму і установки додаткового опору;

$k_1 = R_2/R_1$; $k_2 = R_g/R_1$.

Подібним чином визначимо граничну відносну похибку при обчисленні опору ізоляції полюсів мережі щодо землі

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R_2} = \frac{1}{R_2} & \left(\left| \frac{\partial R_2}{\partial E_0} dE_0 \right| + \left| \frac{\partial R_2}{\partial R_{i3}} dR_{i3} \right| + \left| \frac{\partial R_2}{\partial I_\Sigma} dI_\Sigma \right| + \left| \frac{\partial R_2}{\partial R_g} dR_g \right| \right) = \left| \varepsilon_{E_0} \frac{1-k_2}{2} \right| + \\ & + \left| \varepsilon_{R_{i3}} \left(1 + \frac{k_1-1}{2+k_2\left(\frac{1}{k_1}+1\right)} \right) \right| + \left| \varepsilon_i \left(1 - \frac{1}{k_1} \right) \right| + \left| \varepsilon_{R_g} k_2 \frac{k_1^2-1}{(4k_1+2k_2(1+k_1))} \right|; \\ \varepsilon_{R_1} & = \left| \varepsilon_{R_{i3}} \left(1 + \frac{1}{k_1} \right) \right| + \left| \varepsilon_{R_2} \left(1 - \frac{1}{k_1} \right) \right|. \end{aligned}$$

Для кількісної оцінки похибки будемо вважати $k_1 \leq 5$; $k_2 \leq 1$; $\varepsilon_{U_H} = \varepsilon_{E_0} = \varepsilon_i = \varepsilon_{R_g} = 0,01$; тоді для граничних випадків $\varepsilon_{R_{i3} \max} = 7,2\%$; $\varepsilon_{R_1 \max} = \varepsilon_{R_2 \max} = 10,8\%$. Вплив зміни опору ізоляції під час вимірювання можна усунути шляхом дублювання експерименту.

Для вибору рівня сигналу, що накладається на контрольовану мережу, розглянемо граничний випадок $R_1 \rightarrow 0$, а $R_2 \rightarrow \infty$, тоді

$$I = \frac{E_0}{R_g}, \text{ а } I' = \frac{U_H}{R_g/2},$$

тому $E_0/I = 2 U_H/I_H$ і струми будуть однакові, коли $U_H = E_0/2$.

Висновки по розділу:

1. Доведено, що зміни технічного стану ізоляції окремих елементів системи електропостачання (СЕП) викликані утворенням шунтових зв'язків між струмопровідними частинами мережі та землею. Під впливом перенапруг відбувається різке зниження активного опору цих шунтових шляхів, тоді як плавне змінення опору пов'язане з впливом зволоження. Динамічна характеристика активного опору ізоляції мережі відносно землі є важливим інформативним показником для діагностики несправностей ізоляції окремих компонентів неруйнівними методами.

2. Запропоновано діагностичну модель працездатності ізоляції двопровідних мереж постійного струму, яка базується на комбінованому описі — із застосуванням одночасно непараметричного і параметричного підходів до моделювання мережі. Спершу визначається перехідна характеристика, що включає струм витоку через шунтовий зв'язок та напругу дотику до корпусу заземленого обладнання. Умови працездатності та запас надійності представлені у вигляді залежності максимально допустимого активного опору ізоляції від початкового активного опору мережі до появи шунтового зв'язку при фіксованих значеннях напруги і ємності мережі. При виборі контрольних показників необхідно враховувати не лише загальний активний опір мережі, а й ступінь асиметрії провідностей окремих полюсів. Розроблено алгоритм, програмне забезпечення і отримано кількісні характеристики умов працездатності ізоляції мережі.

3. Теоретично підтверджено оптимальну функціональну характеристику для пристроїв захисту від струмів витоку на землю. Доведено, що за умови сталого відносного значення одного з омічних опорів полюсів R_{1*} і зміні опору ізоляції другого полюса в межах $(m-1)/m \leq R_{2*} \leq \infty$ переважають вимоги до обмеження струму в перехідному режимі і допустима величина опору шунтувального зв'язку визначається як $R_{з.від*} \geq 1/m(1 + R_{2*}/R_{1*})$ а коли $0 \leq R_{2*} \leq (m-1)/m$ переважають вимоги до обмеження струму в сталому режимі і $R_{з.від*} \geq (1 - R_{2*})/(1 + R_{2*}/R_{1*})$.

3 РОЗРОБКА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ ОКРЕМНОГО ПОЛЮСА ТА ЗАХИСТУ ВІД ВИТІКАННЯ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ

3.1 Розробка пристрою для періодичного контролю ізоляції в двопровідних мережах постійного струму

Правила технічної експлуатації передбачають регулярний контроль стану ізоляції РМПС.

Схема принципового пристрою наведена на рис. 3.1. Для підготовки приладу до роботи при натиснутій кнопці його затискачі підключаються до контрольованої мережі постійного струму, а інші затискачі — до мережі змінного струму 220 В, 50 Гц.

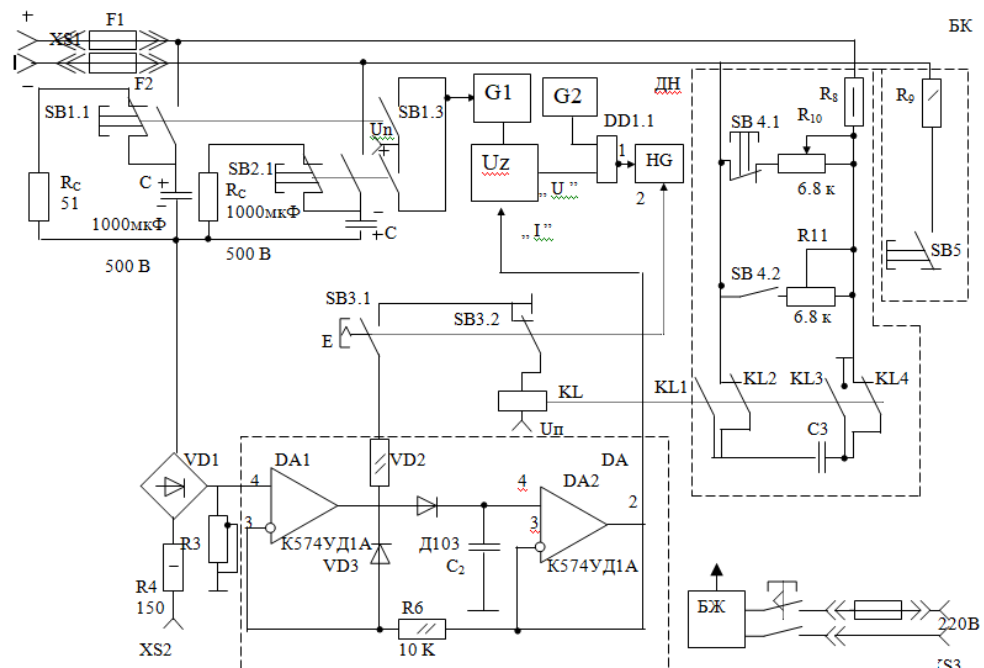


Рисунок 3.1 Принципова схема пристрою періодичного контролю ізоляції

Перевірку роботи приладу здійснюють шляхом імітації ланцюга витікання струму від негативного полюса мережі через резистор. По черзі натискають кнопки SB6, SB5 та короткочасно SB1, в результаті чого блок живлення підключається до схеми приладу, а контакти реле KL3'єднують конденсатор з входом "U" перетворювача UZ, створюючи ланцюг для

заряджання конденсатора C_+ . Струм заряду конденсатора C_+ спричиняє падіння напруги на резисторі $R3$. На вході пікового детектора DA виникає позитивний потенціал, який фіксується конденсатором C_2 та через підсилювач DA2 подається на логічний вхід перетворювача сигналу. Одночасно замикається контакт SB1.3, що запускає одновібратор G1; його вихідний сигнал змінюється з логічного нуля на логічну одиницю, активуючи схему перетворювача. На виході приладу формується сигнал, довжина якого пропорційна відношенню напруги U_0 контрольованої мережі до струму $i_1(0)$, що протікає через C_+ в момент комутації.

На першому виході логічного елементу DD 1.1 з'являються короткі імпульси тактового генератора G2, а на другому – довгий імпульс з виходу перетворювача UZ. При цьому кількість імпульсів буде пропорційна результату від ділення $U_0 / i_2(0)$. Ці імпульси рахують послідовно з'єднані лічильники блоку сигналізації HG (рис. 3.2), на індикаторах якого висвітлюється значення контрольованого опору. Якщо його величина відповідає 100 кОм, то пристрій готовий до роботи.

При відпусканні кнопки SB1 конденсатор C_+ починає розряджатися через резистор R_c . Дані про результати вимірювань зберігаються до моменту натискання кнопки SB3 “Скидання”. На індикаторі при цьому відображаються нульові значення.

Для вимірювання опору ізоляції контрольованої мережі повертають в попереднє положення кнопки SB5 та SB3 і приєднують затискувач XS₂ до “землі” контрольованої мережі.

Опір ізоляції додатного полюса вимірюють шляхом натискання, утримання та відпускання кнопки SB2. В цьому випадку буде заряджатись конденсатор C_- по ланцюгу “+” контрольованої мережі, опір ізоляції полюса R1, “земля”, R4, VD1, R3, C_- , “-” контрольованої мережі. В іншому робота схеми буде такою же, як і при його перевірці. В разі вимірювання опору

ізоляції від'ємного полюса натискають і відпускають кнопку SB3 “Скидання”, а потім SB1. Конденсатор C_+ заряджається по ланцюгу “+” контрольованої мережі, C_+ , VD1, R3, R4, “земля”, “-” контрольованої мережі.

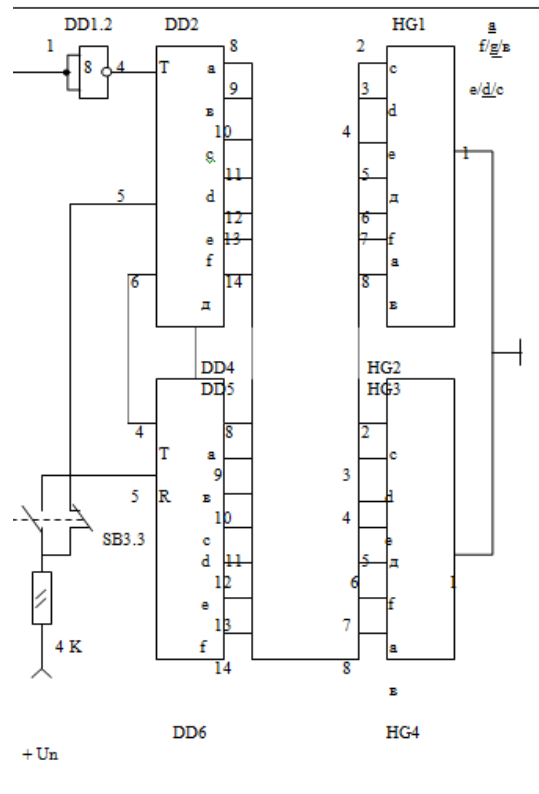


Рисунок 3.2 – Блок сигналізації

Перетворювач UZ (див. рис. 3.3) включає інтегратор на операційному підсилювачі DA3, DA4, компаратор, виконаний на операційних підсилювачах, асинхронний тригер, реалізований за допомогою логічних елементів DD1.1 та DD1.2, польові транзистори VT4 і VT5, аналогові перемикачі на транзисторах VT1, VT2, а також інвертор, зібраний на транзисторі VT3.

У початковому режимі на виході перетворювача присутній логічний нуль, тоді як на інверсному виході DD1.1 — логічна одиниця. Транзистор VT1 відкритий і генерує сигнал на вході польового транзистора DA3.2, що

забезпечує його відкриття. Від'ємний потенціал живлення надходить на вхід (2).

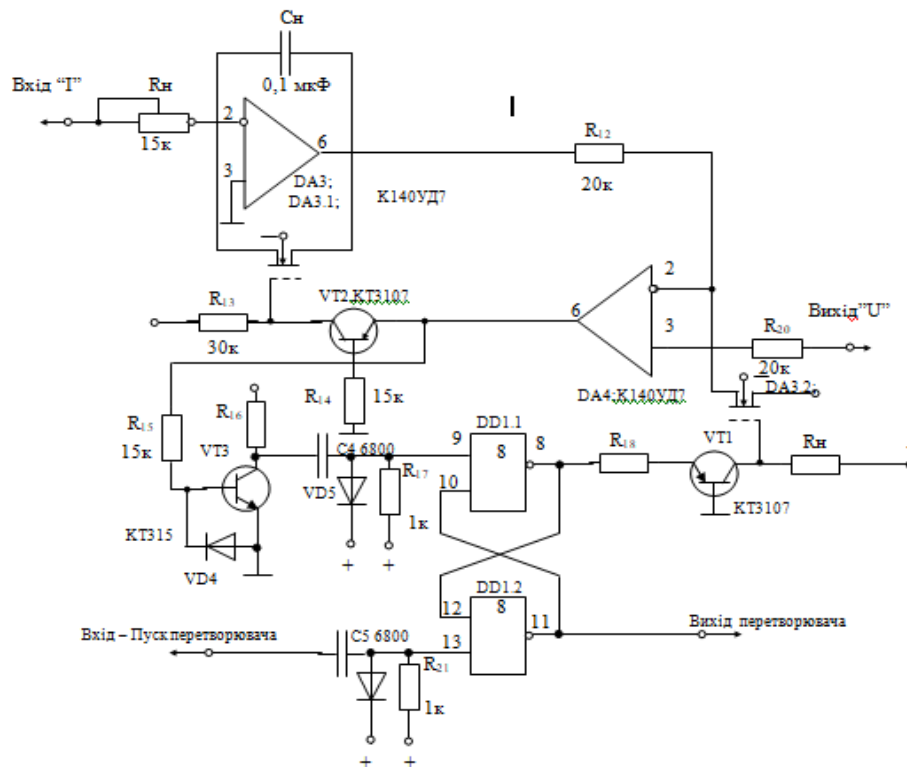


Рисунок 3.3 – Схема перетворювача

Напруга на вході 3 компаратора виступає як опорна і пропорційна напрузі контрольованої мережі, $U_{оп} = k_q U_0$, де k_q - коефіцієнт перетворення компаратор DA4, переводить сигнал у стан додатного насичення. Аналогічна схемі зсуву рівня, яка використовується на виході тригера, включається до виходу (6) компаратора.

Вихід компаратора, що знаходиться в стані додатного насичення, викликає відкривання транзистора DA3.1, який виконує роль ключа та регулює роботу інтегратора. Спочатку перемикач перебуває у замкненому стані, тому на виході інтегратора відсутня напруга.

Транзисторний ключ VT2 виконує функцію імпульсу скидання для тригера, реагуючи на додатній потенціал на виході компаратора, VT3 при цьому здійснюється інвертування сигналу. Керування тригером відбувається за допомогою від'ємних імпульсів, які подаються на входи 9 і 13 і

формується через диференційні ланки. Для захисту входів від перевищення напруги живлення додатніми імпульсами використовуються діоди VD5, VD6

Пусковий імпульс переводить тригер у новий стан, в результаті чого на виході (контакт 11) з'являється логічна одиниця. При цьому закриваються транзистори VT1, DA3.2, а вихід інтегратора підключається до інтегруючого входу компаратора DA4, який переходить у стан від'ємного насичення. Транзистор DA3.1 закривається, і починається інтегрування вхідного сигналу. Напруга на виході інтегратора змінюється від нуля до максимальної від'ємної величини за лінійною залежністю.

$$U_{\text{вих}} = \frac{k_3}{R_i C_i} \int_0^t i_k(0) dt = \frac{k_3}{R_i C_i} i_k(0) t_i, \quad (3.1)$$

де R_i - опір на вході інтегратора;

C_i - ємність зворотного зв'язку інтегратора;

k_3 - коефіцієнт перетворення сигналу на "Вхід І";

t_i - довжина імпульсу.

У той момент, коли напруга на вході інтегратора дорівнює напрузі на інвертуючому вході компаратора, інтегратор прагне перейти у стан додатного насичення, що описується залежністю

$$\frac{k_3}{R_i C_i} i_k(0) t_i = k_q U_0, \quad (3.2)$$

звідкіля

$$t_1 = \frac{k_q}{k_3} R_i C_i \frac{U_0}{i_k(0)} = k_5 \frac{U_0}{i_k(0)}, \quad (3.3)$$

де $k_5 = \frac{k_q}{k_3} R_i C_i$.

3.2. Технічна характеристика та алгоритм функціонування пристрою захисного вимикання в мережах постійного струму

У розділі 2.2 наведено теоретичне обґрунтування методу та захисної характеристики, які застосовуються в пристрої захисту від витоків струму на землю у двопровідній мережі постійного струму. На основі отриманих результатів розробимо функціональну схему, враховуючи при цьому наступні вимоги:

1. Пристрій має забезпечувати постійний моніторинг омичного опору ізоляції полюсів мережі щодо землі та при симетричному зниженні цього опору до критичного рівня (визначеного за формулою (2.11)) видавати команду на відключення мережі постійного струму.

2. Потрібно контролювати максимально допустимий перехідний струм у випадку раптового короткого замикання (за формулою (2.9)) і в разі перевищення цього значення ініціювати вимкнення.

3. Пристрій повинен здійснювати нагляд за постійним струмом, що проходить через місце витoku, і при перевищенні допустимого значення (визначеного за (2.10)) подавати сигнал на відключення мережі.

4. Конструкція пристрою має гарантувати його стабільну роботу за будь-яких умов пошкодження та режиму експлуатації мережі.

5. Захисна характеристика повинна автоматично коригуватися залежно від змін напруги в мережі у необхідному напрямку.

6. Пристрій має забезпечувати автоматичне повернення до вихідного стану після спрацювання системи запуску.

7. Необхідно передбачити автоматичний контроль технічного стану ключових компонентів пристрою.

8. Конструкція та використані елементи пристрою повинні гарантувати потрібну чутливість і надійність у процесі роботи.

9. Пристрій має виконувати безперервний моніторинг омичного опору ізоляції полюсів мережі відносно землі і у випадку симетричного зниження

цього опору до неприпустимого рівня (визначеного за формулою (2.11)) подавати команду на відключення постійного струму.

10. Забезпечувати контроль максимально допустимого перехідного струму при раптовому короткому замиканні, визначеному за формулою (2.9), і в разі перевищення цього значення активувати сигнал вимкнення.

11. Контролювати стабільність струму в зоні витоку, і якщо його значення перевищує допустиме (за формулою (2.10)), ініціювати відключення мережі постійного струму.

12. Конструкція пристрою повинна гарантувати надійну роботу незалежно від типу пошкодження та режиму експлуатації мережі.

13. У разі зміни напруги в мережі, захисна характеристика пристрою має коригуватися у відповідному напрямку.

14. Пристрій повинен автоматично повертатися до початкового стану після активації пускових механізмів.

15. Необхідно забезпечити автоматизований контроль технічного стану ключових компонентів пристрою.

16. Пристрій і його елементна база мають гарантувати необхідний рівень чутливості та надійності під час експлуатації.

Функціональна схема пристрою, що відповідає зазначеним вимогам, представлена на рисунку 3.4. Основними складовими цієї схеми є ємнісні дільники С1 і С2, а також омичний дільник напруги R1; блок виділення активної компоненти струму (1); логічні елементи (2, 7); обчислювальний блок (3); виконавчий механізм (4); блок контролю перехідного струму (5); керуючий блок (6); а також блок контролю асиметрії напруг полюсів відносно землі (8) [17, 23].

При симетричному зниженні опору ізоляції полюсів мережі щодо землі пристрій має активуватися у випадку, коли опір мережі

$$R_m=R_1=R_2=\frac{U_m}{I_{д.б.}}-2R_{доп. \min.} \quad (3.4)$$

В сталому режимі спрацювання ПЗВ повинно відбуватись, якщо опір замикання на землю

$$R_3^{(c)} = \frac{U_0 R_1 - I_{д.б.} R_1 R_2}{I_{д.б.} (R_1 + R_2)}, \quad (3.5)$$

де $R_1 = R_2 = R$

$$R_3^{(c)} = \frac{U_0 - I_{д.б.} R}{2I_{д.б.}}. \quad (3.6)$$

Обмеження струму через місце витікання в перехідному режимі визначається по (2.9), тобто

$$R_3^{(п)} = \frac{U_m}{m I_{д.б.} (1 + R_1 / R_2)}, \quad (3.7)$$

де $m = i_{д.б.} / I_{д.б.} = 200 / 15 = 13,3$.

На рисунку 3.5 показана принципова схема захисту від струмів витоку в двопровідних мережах постійного струму. Тривалість напруги U_{14} є достатньою для активації виконавчого блоку захисту.

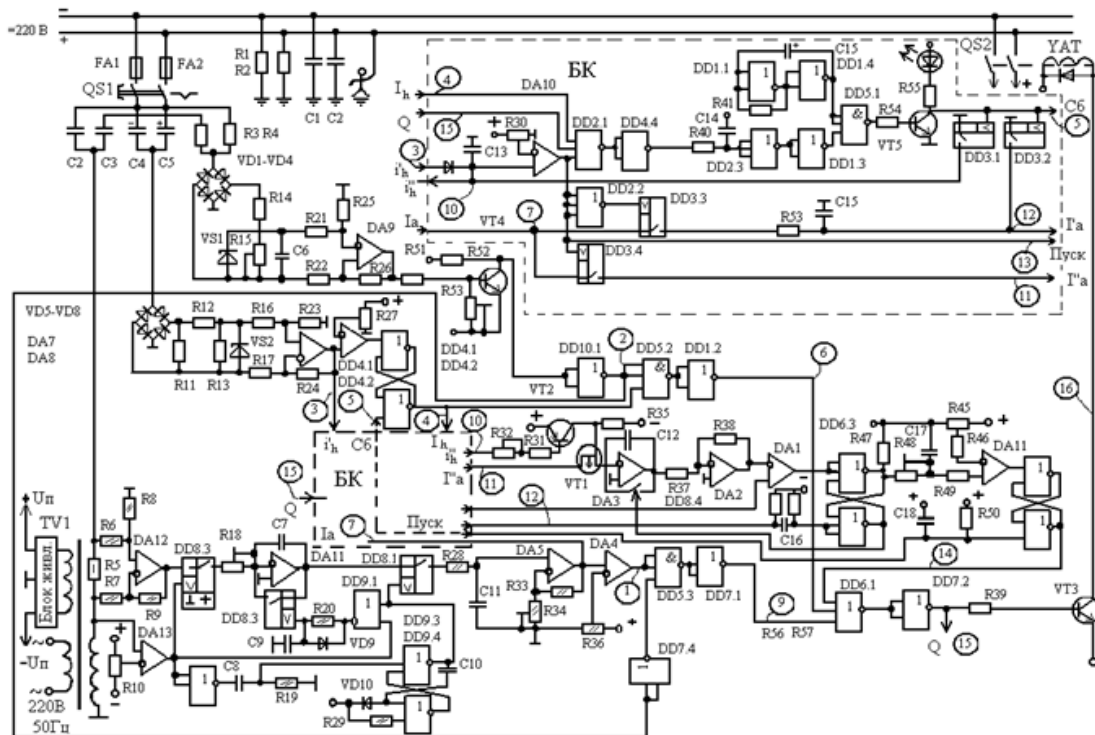


Рисунок 3.5 – Принципова схема захисту від витікання струму на землю в дво провідній мережі постійного струму

Схема функціонує наступним чином. При підключенні первинної обмотки трансформатора TV1 до мережі з напругою 220 В і частотою 50 Гц, на вторинній обмотці TV1 з'являється напруга. Під її впливом через резистор R5 проходить струм, який обернено пропорційний загальному опору ізоляції полюсів мережі відносно землі (рис. 3.5). На вході елемента DA12 формується сигнал, що пропорційний цьому струму, а на інвертуючому вході DA13 – сигнал, пропорційний напрузі тестового сигналу. На виході DA13 формується меандр, інвертований відносно вхідного сигналу. Цей сигнал проходить через інвертор DD9.2 та імпульсний формувач, що складається з елементів C8 і R19 (рис. 3.6). Він керує RS-тригером DD9.3-9.4.

Затримка повернення тригера забезпечується ланцюгом C10, R29. Вихідна напруга тригера змінюється з плином часу.

Під час негативної півхвилі тестової напруги відкривається ключ DD8.3, що відбувається через подачу сигналу на його керований вхід. У той же час на вході інвертора DA11 з'являється синусоїдальна напруга, яка виходить з перетворювача зміщення DA12. Ця напруга пропорційна струму і має невеликий зсув фази вперед відносно тестового сигналу. Після відкриття ключа DD8.3 з деякою затримкою відкривається також ключ DD8.2, і запускається процес інтегрування. Вихідний сигнал інтегратора досягає максимуму, якщо фази струму та тестової напруги співпадають. Якщо ж струм випереджає на кут, вихідна напруга DA11 стає рівною нулю. Через ємнісний вплив конденсаторів C1 і C2 напруга на виході DA6 недостатня, тому додатково використовується підсилювач DA9. Сигнал із виходу DA5, посилений і пропорційний активній складовій струму, подається через ланцюг блоку скидання та комутації 6 на блок обчислення і через інший канал — на компаратор DA4. Поріг спрацьовування компаратора DA4 задається резистором R35. Резистор використовується для налаштування порогу спрацьовування при рівномірному зниженні омичного опору ізоляції. Коли напруга на першому вході компаратора DA4 перевищує опорну напругу, подану на його інверсний вхід, DA4 змінює свій стан і на виході

з'являється позитивний потенціал. Цей сигнал надходить на вхід логічного елемента DD5.3 (2И-НЕ), а далі через інвертор DD7.1 передається на один з входів виконавчого пристрою. Логічна схема, що включає DD5.3 і DD7.1 (позначена як 2 на рис. 3.5), формує сигнал логічної одиниці для виконавчого органу тільки при симетричному зниженні опору ізоляції. Якщо виникає однополюсне коротке замикання, сигнал блокується, оскільки на другий вхід DD5.3 надходить сигнал від блоку несиметрії.

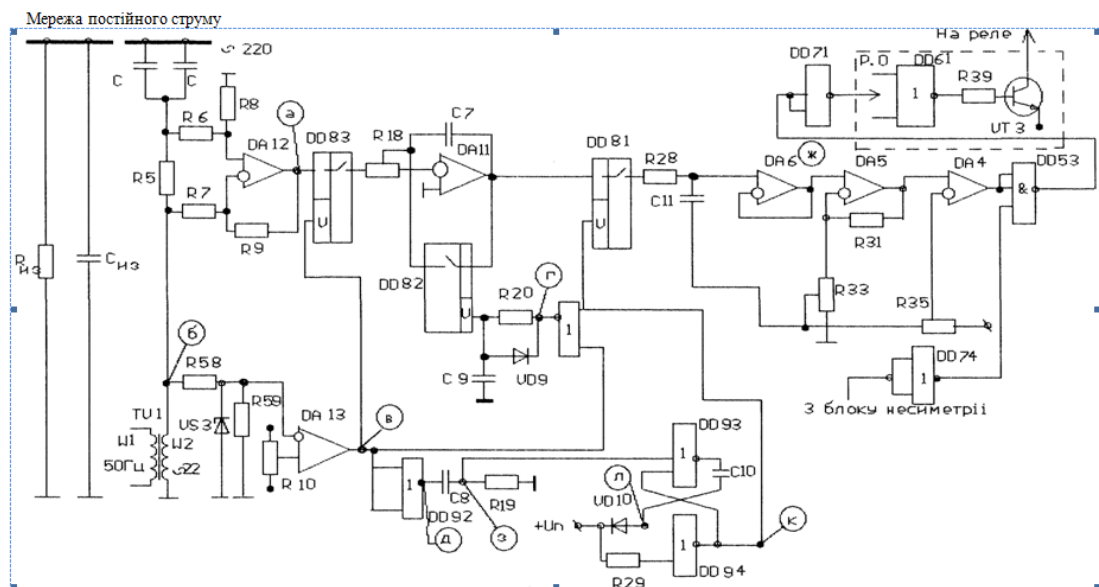


Рисунок 3.6 – Принципова схема блоку виділення активної складової струму витікання на землю

При виникненні короткого замикання на одному з полюсів мережі відбувається перезарядка конденсатора C1, що спричиняє появу струму перехідного процесу. Цей струм випрямляється діодним мостом VD5-VD8 і подається на вхід операційного підсилювача DA8. Разом із резисторами R16, R17, R23 та R24 DA8 забезпечує зміщення вхідного сигналу відносно землі на своєму виході (рисунок 3.5). Подальший сигнал надходить на компаратор DA7, який при перевищенні встановленої порогової величини, налаштованої резистором R27, змінює свій стан.

Сигнал, що надходить з виходу DA7, змінює стан тригера DD4.1, DD4.2. На виході RS-тригера з'являється логічна одиниця, яка запускає реле часу у блоці керування і одночасно подається на логічний елемент 7. Якщо надходить сигнал від блоку несиметрії, логічний елемент 7 передає його на реагуючий орган виконавчого блоку 4. Електронне реле часу в блоці керування, активоване цим сигналом, спрацьовує з витримкою часу і подає сигнал скидання на вхід тригера DD4.1, DD4.2, повертаючи його у початковий стан. Блок несиметрії виконує функцію блокування запуску пускових механізмів блоку виділення активної складової та блоку фіксації струму перехідного процесу.

На рис. 3.7 і 3.8 зображена електрична принципова схема та відповідно осцилограми напруг в контрольних вузлах блоку несиметрії.

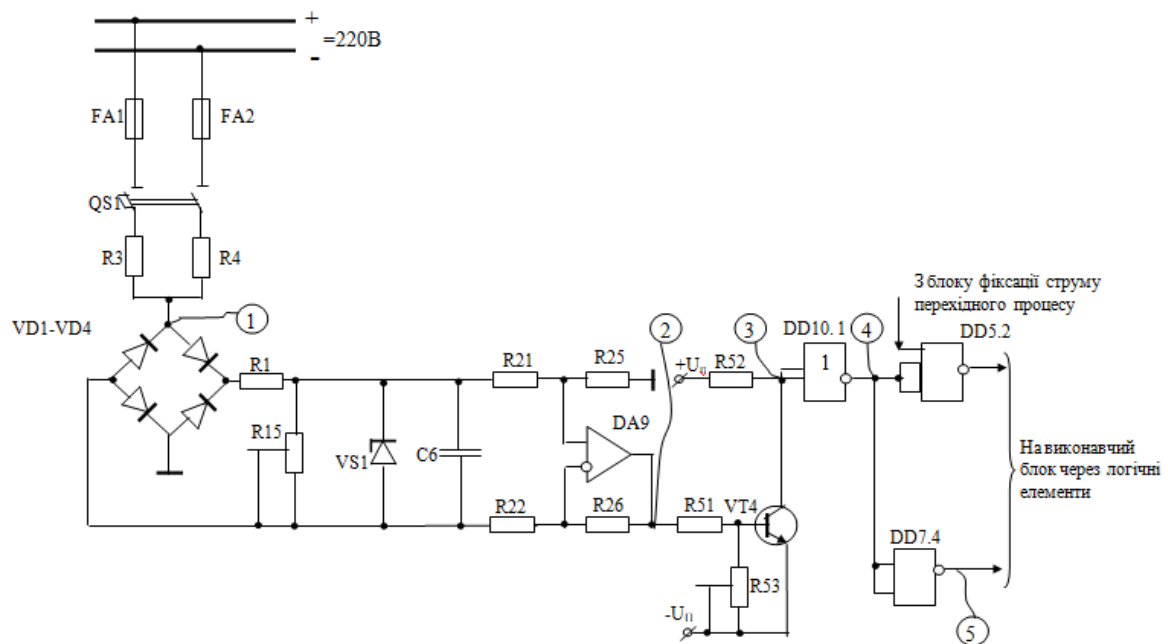


Рисунок 3.7 Принципова схема блока не симетрії.

Якщо в мережі немає замикання на землю, потенціал у вузлі 1 (рис. 3.7) збігається з потенціалом землі, через що транзистор VT4 залишається закритим. На виході інвертора DD10.1 присутній логічний нуль, а на виході логічного елемента «2I-НІ» — логічна одиниця. Цей сигнал надходить на інвертор, а потім передається до виконавчого блоку. Вихід

інвертора DD7.4 також має логічну одиницю, що дозволяє сигналу з блоку виділення активної складової струму проходити до виконавчого блоку.

При замиканні полюса на землю в точках 1 і 2 напруга поступово зростає, що призводить до відкриття транзистора VT4. У вузлі 3 (рис. 3.7) формується логічний нуль, а у вузлі 4 — логічна одиниця, що дає можливість спрацювати захисту за сигналом з блоку фіксації струму перехідного процесу.

У вузлі 5 з'являється логічний нуль, а сигнал DA8, у поєднанні з резисторами R16, R17, R23 і R24, використовується для зміщення вхідного сигналу відносно землі на виході DA8 (рис. 3.7). Далі цей сигнал подається на вхід компаратора DA7, і якщо він перевищує встановлений поріг, регульований резистором R27, компаратор змінює свій стан (рис. 3.7).

Сигнал, що надходить з виходу DA7, змінює стан тригера DD4.1, DD4.2. На виході RS-тригера з'являється логічна одиниця (рис. 3.7), яка активує реле часу в блоці керування та одночасно подається на логічний елемент 7. Якщо від блоку несиметрії надходить сигнал, логічний елемент 7 передає його далі до виконавчого блоку 4 (рис. 3.5). Запущене електронне реле часу у блоці керування працює з певною затримкою та після цього подає на вхід тригера DD4.1, DD4.2 сигнал скидання, який повертає тригер у початковий стан.

Функції блоку несиметрії полягають у блокуванні пускових сигналів блоку виділення активної складової та блоку фіксації струму перехідного процесу.

На рисунку 3.8 представлені осцилограми напруг у контрольних точках блоку несиметрії. Коли в мережі немає замикання на землю, потенціал у вузлі 1 (рис. 3.2.6) збігається з потенціалом землі, через що транзистор VT4 перебуває у закритому стані; на виході інвертора DD10.1 спостерігається логічний нуль, а на виході логічного елемента “2I-HI” — логічна одиниця. Цей сигнал проходить через інвертор і подається до виконавчого блоку. Вихід

інвертора DD7.4 також містить логічну одиницю, що дає змогу сигналу з блоку виділення активної складової струму проходити до виконавчого блоку.

При замиканні одного з полюсів на землю напруга в точках 1 і 2 поступово підвищується. В результаті транзистор VT4 відкривається, у вузлі 3 (рис. 3.2.6) виникає логічний нуль, а у вузлі 4 – логічна одиниця, що активує захист на основі сигналу з блоку фіксації струму перехідного процесу. Вузол 5 демонструє логічний нуль.

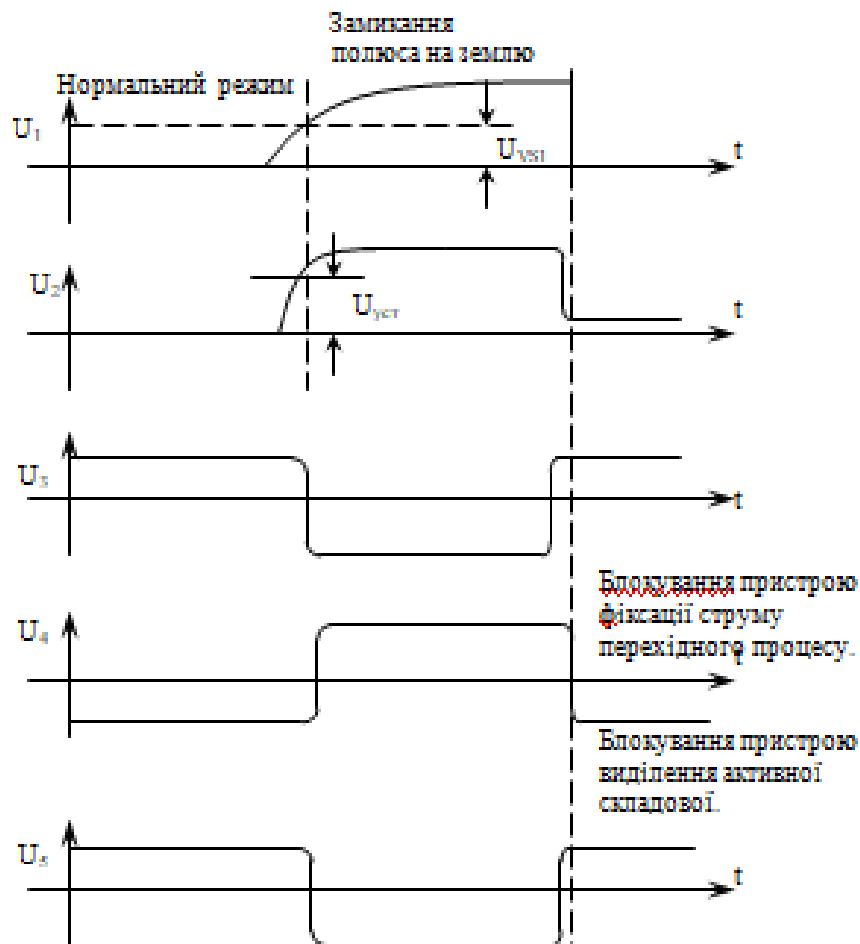


Рисунок 3.8 Осцилограма напруг в контрольованих вузлах блоку несиметрії мережі відносно землі

Блок несиметрії запобігає подачі сигналу на спрацьовування, який надходить від блоку виділення активної складової струму. Це зумовлено тим, що в такій ситуації захист активується за сигналом від блоку фіксації

величини струму перехідного процесу або від блоку обчислення струму через місце замикання

$$I_h = i_{h(0)} \frac{I'_a}{I''_a} . \quad (3.8)$$

Резистор R14 разом зі стабілітроном призначені для захисту операційного підсилювача від перенапруг у мережі. Фільтр нижніх частот, який складається з R14 і C6, запобігає хибним спрацюванням блоку при впливі пульсацій частотою 50 Гц і вище. Резистори R15 і R53 відповідальні за регулювання чутливості блоку несиметрії та уставки його спрацювання відповідно.

Блок керування і комутації елементів ПЗВ (рис. 3.9) забезпечує взаємодію сигналів від пускових органів раніше описаних блоків із блоком обчислення та виконавчим блоком згідно з визначеним алгоритмом.

У нормальному стабільному режимі робота блоку відбувається таким чином. На входах «Скид» (вузол 1), « I_h » (вузли 2 і 3) та « I_a » (вузол 6) підтримуються потенціали від'ємного джерела живлення та нуля (див. рис. 3.10: U1-U3, U6). Конденсатор пускового детектора VD11–C13 знаходиться у розрядженому стані, на виході компаратора DA10 формується від'ємний сигнал, що відповідає логічному нулю; також розряджений конденсатор у часовому ланцюзі R10–C14. Мультивібратор DD11–DD14 генерує імпульси скидання, але вони блокуються логічним елементом «3И-НЕ» DD5.1 через присутність логічного нуля в контрольному вузлі 10. Транзистор VT5 відкритий, світлодіод на виході «Скидання» (вузол 13) знаходиться у вимкненому стані (логічний нуль), ключі DD3.1, DD3.2, DD3.4 розімкнені, а DD3.3 — замкнений. На виходах « I_h » (вузол 5), « I'_a » (вузол 16), « I''_a » (вузол 14) — сигнал “земля”, а на виході “Пуск” (вузол 7) — логічний нуль.

Найбільш критичним є режим включення кабельної мережі, коли розподілена ємність ізоляції знаходиться в незарядженому стані. При такому

ввімкненні мережа постійного струму сприймає це як раптове замикання на землю. В результаті на виході «Ih» пристрою формується сигнал логічної одиниці.

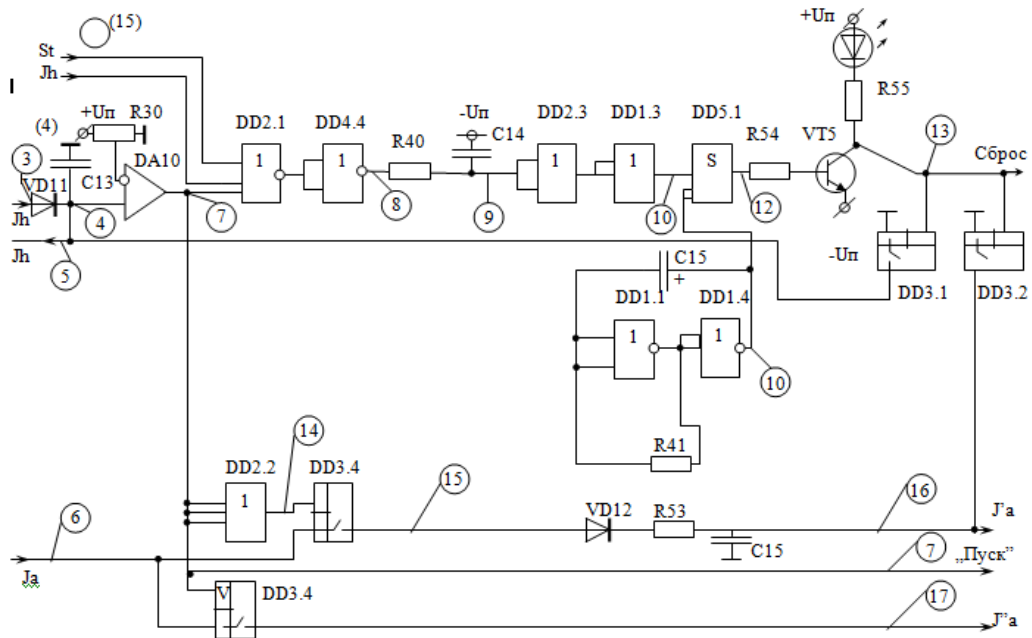


Рисунок 3.9 Принципова схема блока контролю керування і комутації елементів схеми ПЗВ

Піковий детектор фіксує максимальне значення сигналу (вузол 4), що призводить до зміни стану компаратора DA10. Виникнення логічної одиниці на виході DD4.1 (вузол 8) запускає поступовий заряд конденсатора C14. Після певного часу $t = 3\tau = 3R_4C_{14}$ на виході DD1.3 з'являється логічна одиниця, а на виході DD5.1 – імпульси скидання. Ці імпульси подаються через транзистор VT5 на світлодіод, який починає блимати з частотою цих імпульсів. Ключі DD3.1-DD3.4 періодично замикаються, викликаючи скидання тригерів у інших захисних блоках, а конденсатор C13 розряджається. У вузлах 1, 3, 4 та 8 з'являються логічні нулі. Водночас конденсатор C14 заряджається, через що на виході елемента DD1.3 (вузол 10)

після деякого часу з'являється логічний нуль. Імпульси на виході DD5.1 зникають, і процес скидання завершується.

При поступовому зменшенні опору ізоляції напруга в вузлі 6 зростає, і її значення фіксується за допомогою VD12. Ця напруга прямо пропорційна активній складовій струму витoku на землю.

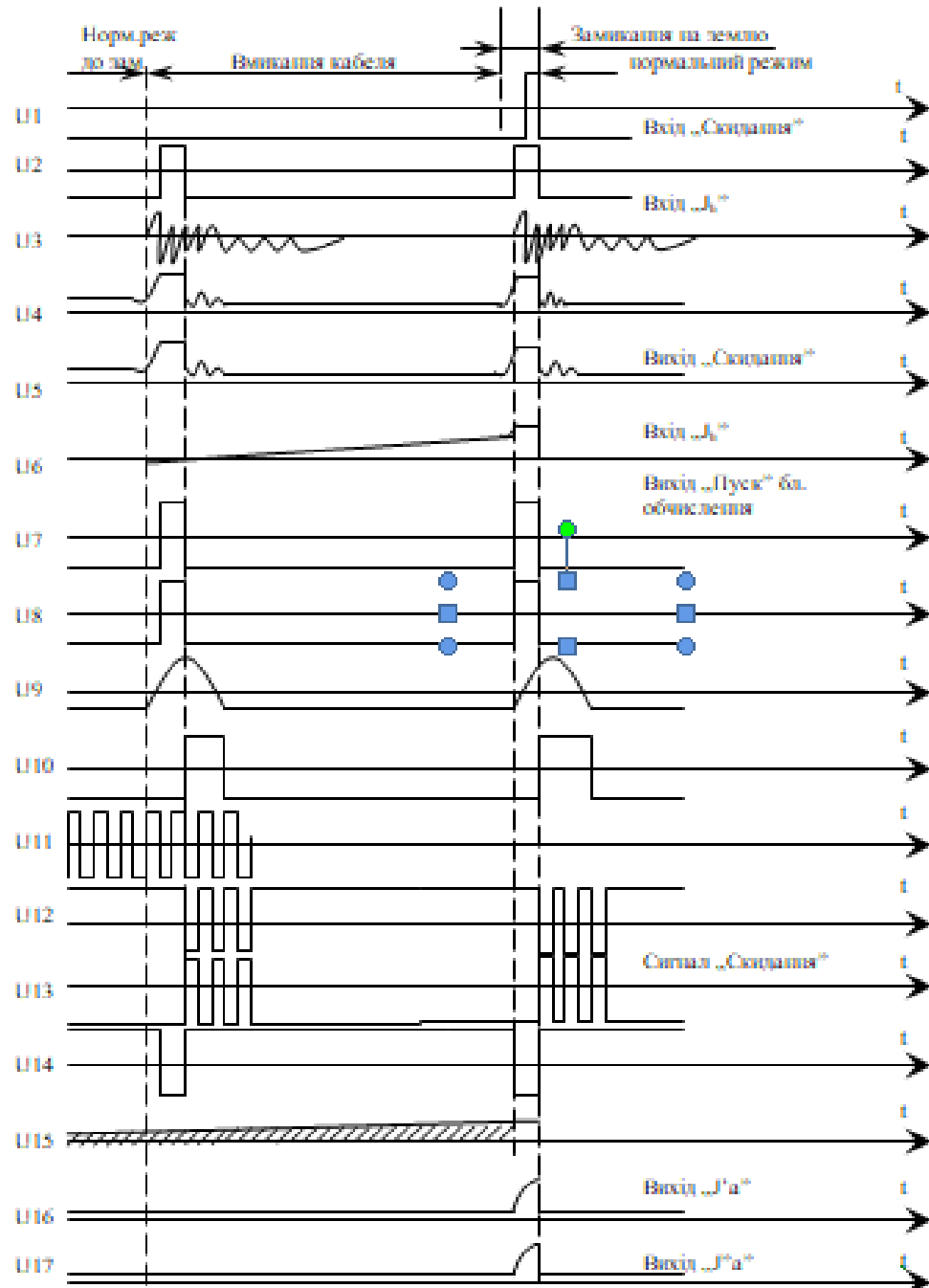


Рисунок 3.10 Осцилограма напруг в контрольованих вузлах блока керування комутації елементів схеми ПЗВ

Поява сигналу у вузлі 3 спричиняє перемикання компаратора DA10, після чого напруга на конденсаторі C13, зарядженому цим сигналом, надходить на вхід “Ih” (вузол 5) та далі — на вихід блоку обчислення. Сигнал “Ih” (вузол 5) інформує про величину струму витікання, навіть якщо він не є небезпечним для людини, на відміну від сигналу “Ih`” (вузол 2), що надходить з блоку контролю значення перехідного струму через замикання на землю та активується при перевищенні встановленої уставки компаратора DA7 згідно з вимогами безпеки.

За наявності сигналів від блоку обчислення, блоку виділення активної складової струму або блоку контролю значення перехідного струму через місце замикання відбувається активація виконавчого блоку. У вузлі 1 короткочасно з’являється логічна одиниця, відбувається комутація ключів DD3.1-3.4 (рис. 3.9), розряджаються конденсатори C13 та C15, спрацьовують тригери інших блоків, і захисна схема автоматично повертається у вихідний стан.

Принципова схема блоку обчислення струму через місце витікання на землю в сталому режимі наведена на рис. 3.11, а осцилограми напруг у контрольних вузлах — на рис. 3.12.

Блок обчислення визначає величину струму через місце витікання в сталому режимі та порівнює її з еталонним значенням.

Коли замикання на землю відсутнє ($i_h = 0$), транзистори VT1 та VT2 відкриті, ключ DD8.4 замкнений, що шунтує інтегратор DA3. На виході RS-тригера DD6.2, DD6.3 присутня напруга живлення.

У момент виникнення замикання підвищується напруга (рис. 3.12), а також напруга в вузлі 4 (рис. 3.11). Формувач сигналу, що складається з елементів R56, C16 та R57, перетворює цю напругу у одиничний імпульс.

Логічна одиниця на виході DA10 (вузол 7 або 2) змінює сигнал на виході логічних елементів DD2.1 і DD4.4 (вузол 8), що призводить до початку заряду конденсатора C14.

Елементи DD1.1, DD1.4 та DD5.1 працюють аналогічно до випадку вмикання кабельної мережі.

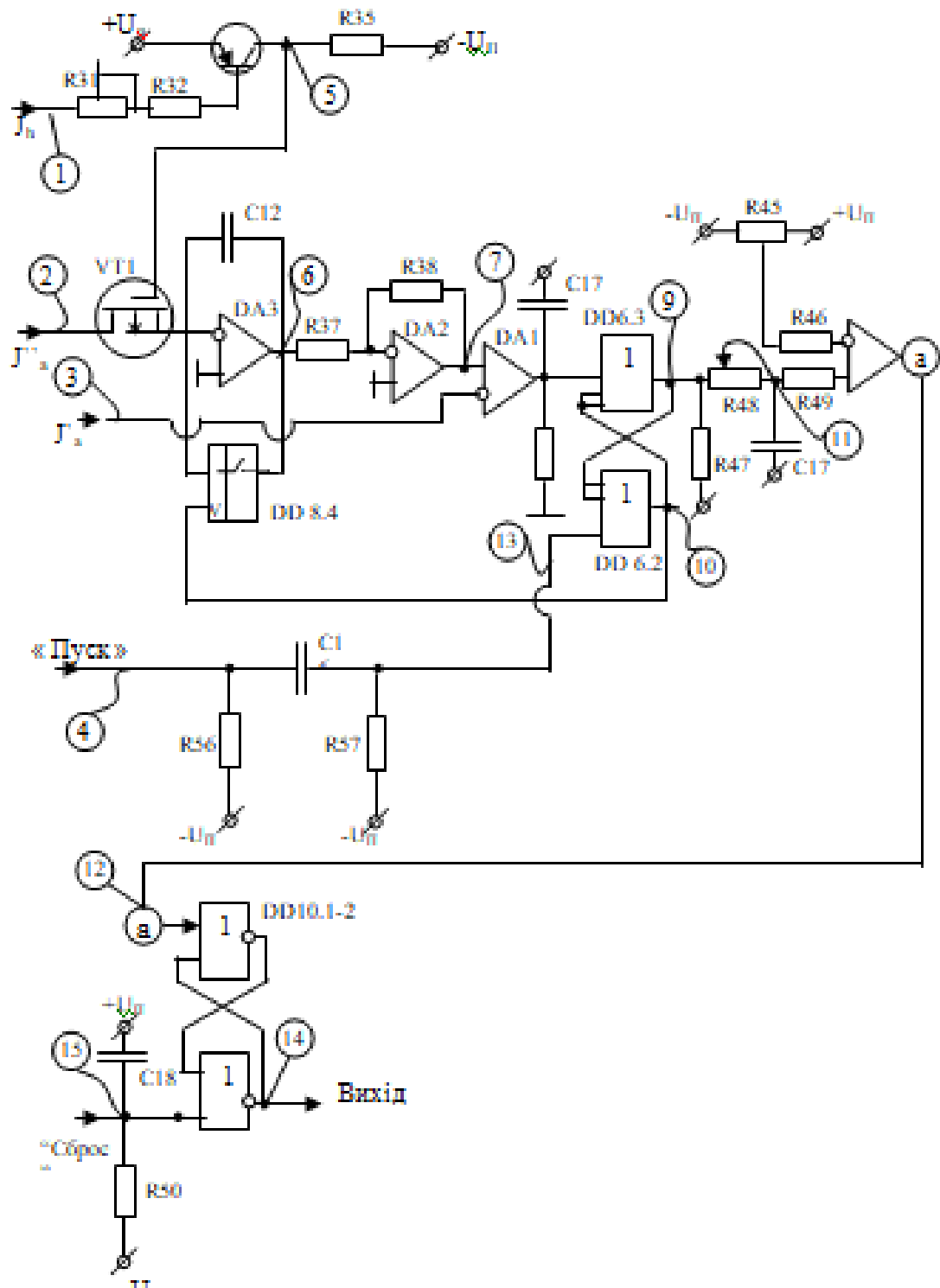


Рисунок 3.11 – Схема електрична принципова блока обчислення струму через місце замикання на землю в сталому режимі

У разі виникнення замикання на землю (рис. 3.9), за умов наявності логічної одиниці на виході компаратора DA10, розмикається ключ DD3.3 і одночасно замикається, ключ DD3.4, ємність C15 запам'ятовує сигнал, пропорційний активній складовій струму витікання на землю " I'_a " (вузол 16), а на виході " I''_a " з'являється сигнал, пропорційний активній складовій струму витікання після замикання на землю " I'_a ". Ці сигнали " I_h " (вузол 5), " I'_a " (вузол 16), " I''_a " (вузол 17), "Пуск" (вузол 7) надходять на відповідні входи блоку обчислення, а з нього – на виконавчий орган.

Блок обчислення відповідає за визначення струму через місце його витікання в сталому режимі та порівняння його з еталонним значенням.

Коли в мережі відсутнє замикання на землю ($i_h = 0$), транзистори VT1 і VT2 знаходяться в відкритому стані, а ключ DD8.4 замкнений, що шунтує інтегратор DA3. В цьому випадку на виході RS-тригера DD6.2 і DD6.3 утримується напруга блоку живлення, що означає стабільну роботу без спрацьовування.

Проте, коли виникає замикання на землю (як показано на рис. 3.12), напруга на входах відповідних вузлів зростає. Це викликає зміну напруги на вузлі 4 (рис. 3.11). Формувач сигналу, який складається з елементів R56, C16 і R57, перетворює змінюючу напругу на одиничний імпульс.

Цей імпульс перемикає тригер DD6.2, DD6.3 (вузол 9). На його виході з'являється додатний потенціал, що відповідає логічній одиниці. Інтегруючий ланцюг, який включає резистор R48 та конденсатор C17, перетворює довжину імпульсу в певну напругу, що корелює із значенням струму витікання.

На другому виході тригера (вузол 10) напруга дорівнює логічному нулю. У цей момент розмикається ключ DD8.4, і процес інтегрування запускається через інтегратор DA3. Це ініціює подальше обчислення та обробку сигналу, що дозволяє визначити, чи відбувається небезпечне

витікання струму через ізоляцію. Інвертор DA2 змінює від'ємну полярність сигналу U_6 на додатну - U_7 відносно загальної точки джерела живлення, DA1 підсилює результат ділення, порівнюючи між собою величини U_7 ($i_{h(0)}/I_a''$) і U_3 (I_a').

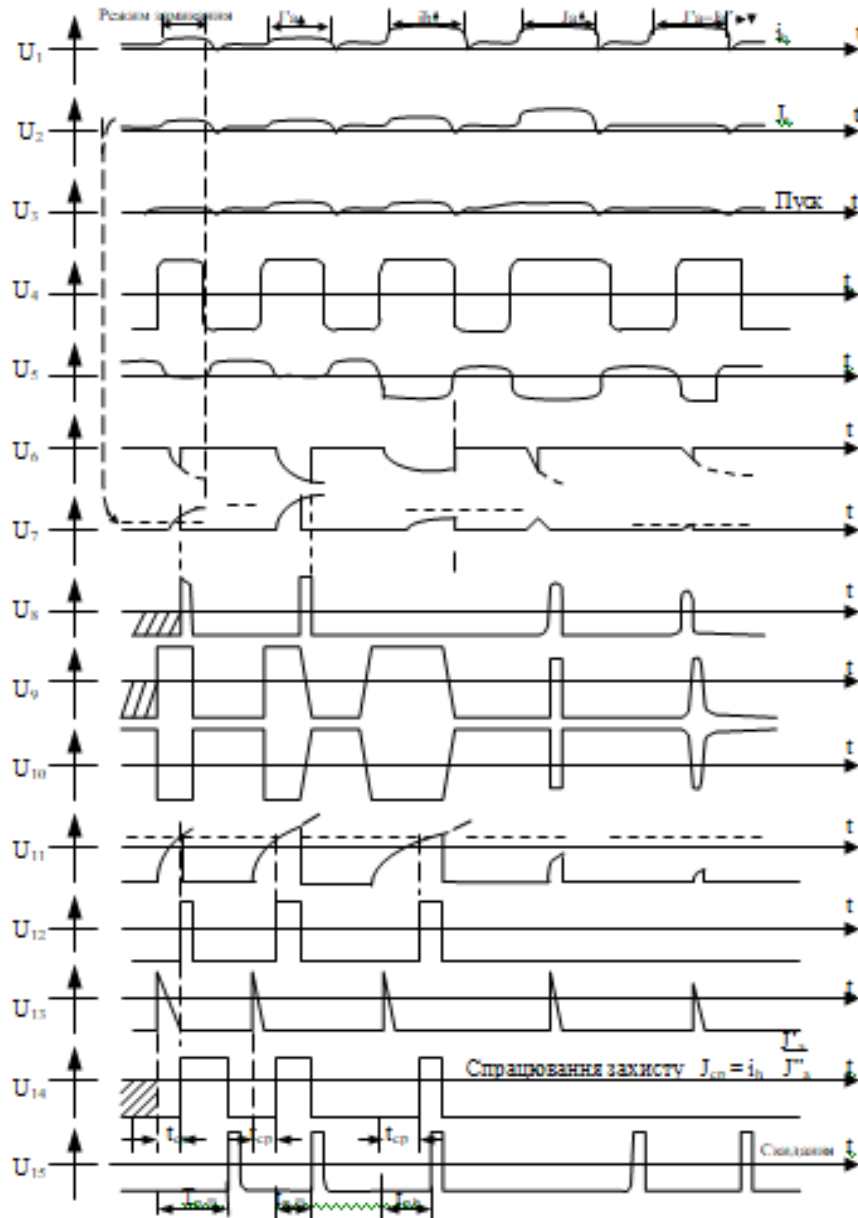


Рисунок 3.12 – Осцилограма напруги в контрольованих вузлах блока обчислень.

В разі досягнення рівня логічної одиниці тригер DD6.2, 6.3 переходить в свій попередній стан і процес інтегрування закінчується; замикається ключ

DD8.4, шунтуючи DA3 ($U_B = 0$). У момент, коли напруга в вузлі 11 досягає рівня, який перевищує уставку спрацювання компаратора DA14, на його інверсному вході виникає сигнал, що призводить до зміни стану на виході DD10.1-2 (вузол 12). З цього моменту на виході DD10.1-2 з'являється логічна одиниця.

Ця логічна одиниця буде підтримуватись на виході до тих пір, поки не відбудеться скидання тригерів і зміна стану ключів. Зміна стану ініціюється сигналом, що надходить з блоку керування. Тобто, скидання всіх блоків захисту відбудеться після певного часу або після того, як система прийме рішення щодо обробки ситуації, коли сигнал від блоку керування впливає на стан тригерів.

3.3 Методика розрахунку ефективності захисного вимикання, інформаційно-вимірювальної підсистеми контролю ізоляції та пошуку пошкоджень в розподільних мережах постійного струму

Впровадження захисного вимикання, івп контролю ізоляції та пошуку місць пошкодження в дво провідних мережах постійного струму, дозволяє підвищити рівень безпеки їх експлуатації, виявити пошкодження на ранній стадії його розвитку та автоматизувати процес пошуку пошкодження. це дозволяє знизити ймовірність враження людини електричним струмом, виникнення відмов, переходу однополюсного замикання в коротке та подвійне замикання на землю, зменшити час пошуку місця пошкодження.

Крім соціального ефекту, визначимо річний економічний ефект у відповідності з методикою [16]. відповідно їй, приведені витрати

$$B = C + E_n K , \quad (3.9)$$

де C - собівартість одиниці продукції;

K - питомі капітальні вкладення в виробничі фонди;

$E_n = 0,15$ - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.
річна економія

$$E = (B_1 - B_2)A_2, \quad (3.10)$$

де B_1, B_2 - приведені витрати до і після початку використання івс пошуку місць пошкодження в мережі постійного струму;

A_2 - річний об'єм виробництва

$$E = [(C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2)]A_2. \quad (3.11)$$

Оскільки ІВП не має аналогів, пошук пошкодження здійснюється почерговим вимиканням приєднань, то можна вважати, що $K_1 \approx 0$.

Впровадження пристрою приводить до зниження шкоди від не до відпустки електроенергії споживачам в разі пошкодження ізоляції мережі відносно землі

$$E = [Ш_1 - Ш_2 - E_n K_2]A_2, \quad (3.11)$$

де $Ш_1, Ш_2$ - шкода від не до відпустки електроенергії до і після початку його використання.

економія за рахунок зменшення шкоди для однієї лінії

$$Ш = Ш_1 - Ш_2 = P(\omega_1 - \omega_2)\tau Ш_a, \quad (3.12)$$

де P - середнє навантаження споживачів, що живляться від однієї мережі;

$\omega_1 - \omega_2$ - частота аварійних вимикань лінії через пошкодження до і після впровадження системи;

τ - середній час перерви електропостачання споживача;

Π_a - питома шкода від недо відпустки квт·год від аварійних перерв.

Економія за рахунок зменшення шкоди для однієї підстанції

$$\Delta\Pi = \Pi_1 - \Pi_2 = P(\omega_1 - \omega_2)\tau\Pi_a N ,$$

де N - середня кількість ліній, що відходять від підстанції.

Впровадження ІВП здійснювалось на підстанції вінницького цпем, для якого розрахункові дані $P = 25$ мвт; $\omega_1 = 0,11$ рік⁻¹; $\omega_2 = 0,05$ рік⁻¹; $m = 6$; $\tau = 0,523$ год; інші дані використані із []: $\Pi_a = 0,7$ грн/квт·год.

тоді

$$\Delta\Pi = 25 \cdot 10^3 (0,11 - 0,05) \cdot 0,523 \cdot 0,7 \cdot 6 = 3294,9 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект використання одного пристрою інформаційно – вимірювальної підсистеми

$$E = \Delta\Pi - E_n K_2 = 3294,4 - 0,15 \cdot 1000 = 3144,9 \text{ грн.}$$

Висновки по розділу:

1. Дослідження показали, що в системі автоматичного контролю технічного стану ізоляції полюсів мережі відносно землі є можливість значного зменшення помилки вимірювання завдяки використанню перехідного процесу заряджання конденсатора, коли він підключається між полюсами мережі та землею. Обрана схема та елементна база дозволяли здійснювати вимірювання опору ізоляції полюсів з похибкою, яка не перевищує 4%. У випадку, коли опори мають асиметричне значення в межах $K_n = R_1/R_2 = 1,10$, похибка збільшується, але не перевищує 8,7%. В умовах промислового застосування похибка може зрости на 2-3% через вплив вищих гармонік постійного струму в мережі.

2. Було доведено, що можна створити пристрій захисного вимикання, який реагує на величину струму витікання в двопровідних мережах постійного струму, забезпечуючи таким чином реалізацію оптимальної

захисної характеристики. Лабораторні тести розробленої схеми та використаної елементної бази показали, що при максимальному струмі витікання ($i_u \geq 200$ мА) пристрій спрацьовує майже миттєво, при цьому з 100 спрацьовувань лише в 9 випадках спостерігається хибне спрацьовування. У сталому режимі для струму витікання $i_u \geq 15$ мА час спрацьовування варіюється в межах 0,5-3 секунди, при цьому кількість хибних спрацьовувань на 100 випадків не перевищує 15. Якщо зміна опору ізоляції відбувається плавно до граничного значення, з 100 спрацьовувань хибних буде не більше 16.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струму на землю в двопровідних мережах постійного струму. Відтак, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює випробування та вимірювання електрообладнання, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [1, 2]: фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Площа одного робочого місця інженера обладнаного ПК, повинна складати не менше 6 м^2 , а об'єм – не менше 20 м^3 .

Живлення силового обладнання проєктної організації та системи освітлення здійснюється від чотирьохпроводної трифазної мережі $380 \times 220\text{В}$ (фазна напруга (фаза – "0") – 220В , а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки.

Розташування монітора ПК має забезпечувати: безпечність роботи в цілому; зручність та ефективність зорової роботи з екраном в вертикальній площині під кутом $\pm 30^0$ від лінії зору, площа екрана при цьому має бути перпендикулярною нормальній лінії зору користувача.

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту, вимогам ПВЕ. У приміщенні, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Комп'ютери та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити

з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника.

Неприпустимим є підключення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв. Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах з урахуванням вимог ПВЕ та Правил пожежної безпеки в Україні. Електромережу штепсельних розеток для живлення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання. При розташуванні в приміщенні за його периметром до 5 комп'ютерів, використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволяється прокладання їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів.

Під час монтажу та експлуатації необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію. Під час ремонту ліній електромережі шляхом зварювання, паяння та з використанням відкритого вогню необхідно дотримуватися Правил пожежної безпеки в Україні. Лінія електромережі для живлення комп'ютерів, їх периферійних пристроїв та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення

(занулення) електроприймачів. Використання нульового робочого провідника як нульового захисного провідника забороняється.

Є неприпустимими: експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками; застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок; застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання; користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання; підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами); використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції. Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у конструкціях машин, приладів та меблях. Доточувати проводи можна тільки шляхом паяння з наступним старанним ізолюванням місць з'єднання.

4.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [26, 27]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати

неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками. Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки;

переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

4.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Конструкція робочого місця інженера-проектувальника повинна відповідати сучасним вимогам ергономіки та Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року [1], характеру виконуваної роботи та забезпечити оптимальне розміщення на робочій поверхні документів, рухомого пюпітра (тримача документів) та обладнання ПК (монітора, системного блоку, клавіатури, пристрою «миша», принтера та інших периферійних пристроїв з урахуванням їх кількості та конструктивних особливостей).

4.3.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони [26]. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні для виконання проектних робіт наведено в таблиці 1.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату для постійних робочих місць

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Ia	22-28	55 при 28°C	0,1-0,2
Холодний	Ia	21-25	75 при 25°C	Не більше 0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату [7] на робочому місці інженера передбачається: в холодну пору року використання калорифера; в літню пору застосування вентиляторів обдува; провітрювання приміщення.

4.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м [26]. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [7]: провітрювання приміщення; цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи; встановлення пиловловлюючих засобів.

4.3.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності [28].

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників

над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	середній	середній	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.3.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» [9] (таблиця 4).

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Творча діяльність, конструювання і проєктування, програмування	86	71	61	54	49	45	42	40	38

Для зниження шуму в приміщенні потрібно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [27]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [26], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [28].

Приміщення для виконання проєктних робіт за вибухонебезпечністю та пожежонебезпечністю відноситься до категорії Д – негорючі речовини і матеріали в холодному стані з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується ІІ ступенем вогнестійкості. До ІІ ступеня вогнестійкості відносяться будівлі з несучими і огорожувальними конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плиткових негорючих матеріалів. В покриттях будівель допускається

застосовувати незахищені сталеві конструкції. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [26] наведено в таблиці 4.6.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати [15] за таблицею 7 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.7 (знаменник).

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповненн я прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	4	REI 15	3	2

Таблиця 4.7 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території офісної будівлі, в якій розташована проєктна організація, встановлено 37 вогнегасників ВП-5(8) [26].

Висновки: Проведено огляд та планування заходів щодо безпечної експлуатації об'єкта дослідження із врахуванням режимів його функціонування.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядається вирішення проблеми покращення захисної характеристики в двопровідних мережах постійного струму з метою зменшення хибних спрацьовувань засобів захисного вимикання та уникнення простою високопродуктивних машин і механізмів, а також підвищення надійності та безпеки експлуатації електромеханічного обладнання в таких мережах. Робота також присвячена створенню діагностичної системи для контролю індивідуальної надійності та безпеки двопровідних мереж постійного струму.

В результаті дослідження отримано кілька важливих науково-практичних результатів:

1. Вдосконалення захисної характеристики пристрою: Покращена захисна характеристика пристрою захисного вимикання в двопровідній мережі постійного струму, що дозволяє визначати струм через шунтувальний зв'язок між полюсом мережі та землею, використовуючи змінний струм промислової частоти з автоматичною компенсацією ємності мережі відносно землі. Вимірювання реактивної складової струму порівнюється з нормативними значеннями як в перехідному, так і в сталому режимах роботи.

2. Точність методу контролю омичного опору ізоляції: Доведено, що точність контролю омичного опору ізоляції залежить від співвідношення між фільтраційною ємністю приєднаного пристрою та ємністю мережі. У найгіршому випадку, коли відносна похибка компенсації ємності мережі досягає 10%, максимальна ємність мережі становить 20 мкФ, методична похибка контролю ізоляції не перевищує 10%, а для окремого приєднання — не більше 4%.

3. Покращення точності визначення омичного опору: Для підвищення точності визначення омичного опору ізоляції полюсів у двопровідній мережі постійного струму запропоновано застосовувати комбінацію динамічних та

статичних характеристик вимірювального процесу. Це дозволяє зменшити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибки, викликані коливаннями напруги та зміною навантаження.

4. Удосконалення методу періодичної перевірки опору ізоляції: Запропоновано метод періодичної перевірки опору ізоляції полюсів, де омичний опір визначається як відношення напруги живлення до максимального значення зарядного струму конденсатора, перемикаємого між полюсом мережі і землею. Доведено, що цей метод дозволяє мінімізувати похибки вимірювання, зменшуючи вплив ємності мережі, перехідних процесів при зміні навантаження і часу вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Добровольська Л. Н. Селективний контроль омичного опору ізоляції в дво провідних мережах постійного струму / Л. Н. Добровольська, М. В. Романюк // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. — 2010. — № 4. ч. 2 — С. 90—94.
2. Добровольська Л. Н. Метод контролю ізоляції в двопровідних мережах постійного струму / Л. Н. Добровольська, М. В. Романюк // Энергетика и электрификация. — 1987. — № 4. — С. 17—19.
3. Кутін В. М. . Комбінований метод контролю технічного стану ізоляції полюсів відносно землі дво провідної мережі постійного струму/ Кутін В. М., Кутіна М. В., Продан М. П. // LI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2022), Вінниця, 30-31 травня 2022 р. — Електрон. текст. дані. — 2022. — Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2022/paper/view/15108/12746>.
4. Кутін В. М. Метод та пристрій захисного вимикання в дво провідних мережах постійного струму / В. М. Кутін // Промислова електроенергетика та електромеханіка: Промелектро — 2003. — № 5. — С. 34—40.
5. Методи та засоби контролю ізоляції та захисного вимикання в дво провідних мережах постійного струму: монографія / М.В. Романюк, В.М. Кутін, Л.Н. Добровольська; Луц. нац.техн..ун—т.-Луцк: РВВ ЛНТУ, 2012.-130 с.
6. Захисне вимикання дво провідних мереж постійного струму /В.М. Кутін, В.Т. Заїка // Вісник Вінницького технічного інституту.-Вінниця -2003.- №2.-С.64-67.
7. Комбінована система діагностування оперативних мереж постійного струму на електричних станціях і підстанціях /В.М. Кутін, М. П .Свірідов

,В.В. Жогов //Вісник Вінницького політехнічного інституту.-2003.-№6.-С240-244.

8. Метод і пристрій захисного вимикання дво провідних мереж постійного струму /В.М. Кутін // Вісник Вінницького політехнічного інституту.-2003.-№4.-С.53-58.

9. Система діагностування розподільних мереж постійного струму електричних станцій і підстанцій / В. М. Кутін, О.Є. Рубаненко,Ештіба Алі Мусбах, Аль Нсур Мохамед // Вісник Вінницького політехнічного інституту - 1994.-№2.-С.51-56

10. Захисне вимикання в дво провідних мережах постійного струму [Електронний ресурс] \О.Ю. Безносьок,В.М. Кутін //Матеріали XXXVII регіональної науково-технічної конференції професорського-викладацького складу , співробітників та студентів університету за участю працівників науково –дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області,м. Вінниця, 14-24 березня 2008 р. –Електр. Текст,дані-Вінниця ВНТУ, 2008.-Режим доступу [http// conf/vntuedu/ua/alfvntu/2008ineeem/ess/ftml](http://conf/vntuedu/ua/alfvntu/2008ineeem/ess/ftml).

11. Пошук пошкоджень в оперативних мережах постійного струму / В.М. Кутін,О.Є. Рубаненко // Контроль і управління в складних системах (КУСС_2005): матеріали VII Міжнародної конференції, м. Вінниця, 24-28 жовтня 2005 р.-Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця,- Вінниця , 2005.-С.143.

12. Система контролю опору ізоляції та пошуку місць пошкоджень в розподільних мережах постійного струму електричних станцій та підстанцій /В.М. Кутін, О.Є. Рубаненко // Контроль управління в складних системах (КУСС_97) матеріали 5-ї міжнародної науково- технічної конференції,м. Вінниця 3-5 лютого 1999р.-Вінниця,1999.-С.3-9.

13. Кутін В. М. Метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» [Текст] / В. М. Кутін,

М. В. Кутіна, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету.

14. Букович Н.В. Протиаварійна режимна автоматика електроенергетичних систем: Навч. посібник. - Львів: Видавництво “Бескід Біт”, 2003. – 224 с.

15. Кутін В. М. Математичні моделі керування індивідуальною надійністю розподільної мережі змінного струму / Кутін Василь Михайлович// Вісник ВПІ – 2002 - №4 – С 63 – 67.

16. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. : Правила: ГКД 24.20.507–2003. – Видання офіційне. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2003. – 598 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

17. Технічне обслуговування пристроїв релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації електричних станцій та підстанцій 110 – 750 кВ: ГКД 34.35.604–96 – Видання офіційне. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2019. – 250 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила.).

18. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

19. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об’єктів будівництва. URL: <https://profdom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

20. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

« 4 » Березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську дипломну роботу

ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТУ
ВІД ВИТІКАННЯ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ В ДВОПРОВІДНИХ
МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

08-24.БДР.004.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф.

Михайло КУТІН

« 9 » 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

Олексій ВЛАСЕНКО

« 4 » 03 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струму на землю в двопровідних мережах постійного струму».

Скорочене найменування розробки – «Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струму на землю в двопровідних мережах постійного струму».

Замовник – Кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських дипломних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Мета роботи – зменшення похибки контролю омичного опору ізоляції полюсів відносно землі шляхом зменшення впливу ємності мережі відносно землі та визначення струму через місце витікання, що забезпечує вищий рівень надійності, безпеки та ефективності використання дво провідних мереж постійного струму.

4 Вимоги до розробки

Багаторічний досвід експлуатації розподільних мереж постійного струму (РМПС) показав, що характерним видом пошкодження в них є однополюсне замикання на землю, яке складає не менше ніж 80 % від загальної кількості пошкоджень. Такий вид пошкодження призводить до виникнення між фазного к.з., пожежам, вибухам, ураженням людини електричним струмом, простою високопродуктивних машин і механізмів, хибному спрацюванню релейного захисту на виробництві. Тому одна із

основних задач є забезпечення безпеки експлуатації і ефективності використання за признаванням РМПС шляхом розробки та впровадженню ефективних методів неперервного та періодичного контролю ізоляції і на їх основі оптимізації захисної характеристики захисту від витікання струму.

5 Технічні характеристики

Передбачається дослідження нових методів контролю робото здатності ізоляції РМ:

- технічне завдання: провести дослідження впливу діагностичних показників на робото здатність ізоляції, на прикладі побудованої діагностичної моделі;
- елементна база: режими роботи та параметри кабельної розподільної мережі для живлення засобів автоматики, релейного захисту електроприводу постійного струму; існуючі засоби контролю ізоляції;
- конструктивне виконання: стаціонарна установка, закритого типу, мікропроцесорна елементна база, точність контролю не нижче 20% ;
- показники технологічності: загальний блок неперервного контролю ізоляції облаштовується на шинах підстанції а для селективного контролю на кожному приєднанні. Система неперервного контролю в РМПС на електричних станціях працюють на сигнал а на промислових підприємствах на вимикання.

6. Матеріали, що подаються до захисту

Пояснювальна записка БДР, графічні та ілюстративні матеріали.

7 Джерела розробки

1. Кутін В. М. Метод та пристрій захисного вимикання в дво провідних мережах постійного струму / В. М. Кутін // Промислова електроенергетика та електромеханіка: Промелектро — 2003. — № 5. — С. 34—40.
2. Добровольська Л. Н. Селективний контроль омичного опору ізоляції в дво провідних мережах постійного струму / Л. Н. Добровольська, М. В.

Романюк // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. — 2010. — № 4. ч. 2 — С. 90—94.

3. Добровольська Л. Н. Метод контролю ізоляції в дво провідних мережах постійного струму / Л. Н. Добровольська, М. В. Романюк // Енергетика и электрификация. — 1987. — № 4. — С. 17—19.

4. Кутін В. М. Комбінований метод контролю технічного стану ізоляції полюсів відносно землі дво провідної мережі постійного струму/ Кутін В. М., Кутіна М. В., Продан М. П. // LI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2022), Вінниця, 30-31 травня 2022 р. — Електрон. текст. дані. — 2022. — Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2022/paper/view/15108/12746>.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Техніко-економічне обґрунтування

Визначити основні техніко економічні показники при впровадженні діагностичного комплексу контролю робото здатності ізоляції: капітальні витрати на виготовлення та обслуговування засобів контролю технічного стану ізоляції. Визначення підвищення рівня надійності, безпеки та ефективності використання за призначенням.

10 Технічне обслуговування та ремонт

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

11 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської дипломної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

12. Матеріали, що подаються до захисту БКР

Пояснювальна записка БКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних іспитів, анотації до БКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення БКР діючим вимогам.

13. Вимоги до оформлення БКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи у Вінницькому національному технічному університеті (БКР, МКР)», 2024 р.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСТУ
ВІД ВИТІКАННЯ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ В ДВОПРОВІДНИХ
МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Актуальність, об'єкт, предмет, мета дослідження

Актуальність питання. Розробка і впровадження оптимізованих засобів захисту від струмів витоку на землю, а також покращення систем безперервного та періодичного контролю ізоляції в оперативних мережах електростанцій і підстанцій, є актуальним прикладним завданням. Це сприятиме зменшенню кількості хибних спрацювань, подовженню терміну безвідмовної роботи пристроїв захисту, скороченню втрат електроенергії та підвищенню надійності енергопостачання.

Об'єктом дослідження є процес зміни технічного стану ізоляції полюсів відносно землі в дво провідних мережах постійного струму.

Предмет дослідження – методи та засоби контролю ізоляції в дво провідних мережах постійного струму

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є оптимізація захисної характеристики пристроїв контролю струмів витоку передбачає підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів щодо землі. Це досягається шляхом мінімізації впливу ємнісної складової мережі та визначення величини струму, що протікає через місце витоку на землю. Такий підхід сприяє підвищенню рівня надійності, безпеки та ефективності функціонування двопровідних мереж постійного струму.

Види пошкоджень та ненормальні режими роботи розподільних мережах постійного струму

Пошкодження мереж постійного струму можуть бути різними, залежно від типу пошкодження та його місця в мережі. У загальному, вони поділяються на пошкодження кабелів та інших проводів, пошкодження в електричних машинах та приладах, а також пошкодження в елементах системи живлення.

Пошкодження в кабелях та проводах:

Переривання кабелю/провода:

Це може бути пов'язано з механічними пошкодженнями (прорізами, розривами), або з термічними навантаженнями (перегрів кабелю).

Пошкодження ізоляції:

Руйнування або розтріскування ізоляції може спричинити короткі замикання.

Пошкодження сердечника:

Механічне пошкодження або окислення сердечника може призвести до підвищеного опору та перегріву.

Пошкодження в електричних машинах:

Перегрів та вихід з ладу обмотки:

Це може бути викликано різними факторами, включаючи перевантаження, короткі замикання або несправності в системах охолодження.

Пошкодження колектора (у колекторних шини):

Зношення, окислення або механічні пошкодження колектора.

Пошкодження ротора або якоря:

Втрата магнітних властивостей, або фізичні дефекти.

Пошкодження підшипників:

Зношення або механічні пошкодження підшипників, що можуть призвести до шуму, вібрацій та підвищеного тертя.

Пошкодження в елементах системи живлення:

Несправність перемикачів та запобіжників:

Пошкодження контакту, або вихід з ладу елементів.

Несправності в системах регулювання та захисту:

Порушення роботи датчиків, регуляторів або захисних систем.

Причини пошкоджень:

Пошкодження мереж постійного струму можуть мати різну причину:

Механічні uszkodzenia:

Удар, проріз, розрив кабелів або проводів.

Термічні навантаження:

Перегрів кабелів, машин або елементів системи живлення.

Електричні навантаження:

Короткі замикання, перевантаження, нестабільність напруги.

Пошкодження від природних чинників:

Волога, температура, хімічні речовини, вібрації.

Зношення та старіння:

Поступове погіршення характеристик матеріалів та елементів.

Помилки при монтажі та експлуатації:

Неправильний монтаж, несвоєчасне технічне обслуговування.

Аналіз існуючих методів і засобів контролю ізоляції в розподільних мережах постійного струму

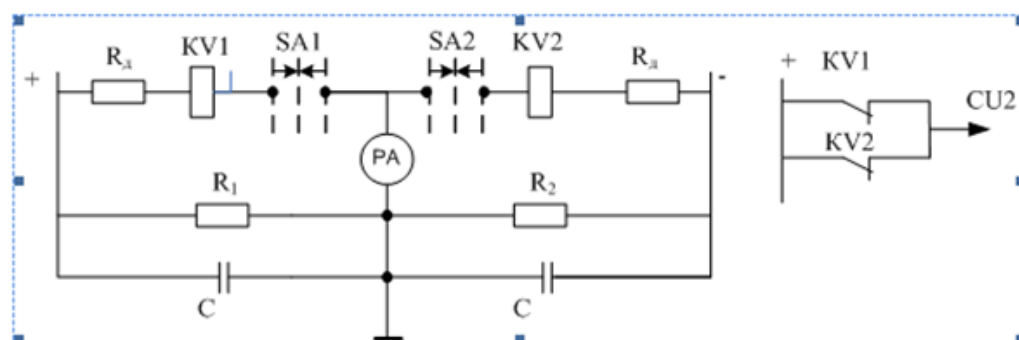


Рисунок 1.1 – Схема заміщення контролю ізоляції мережі постійного струму

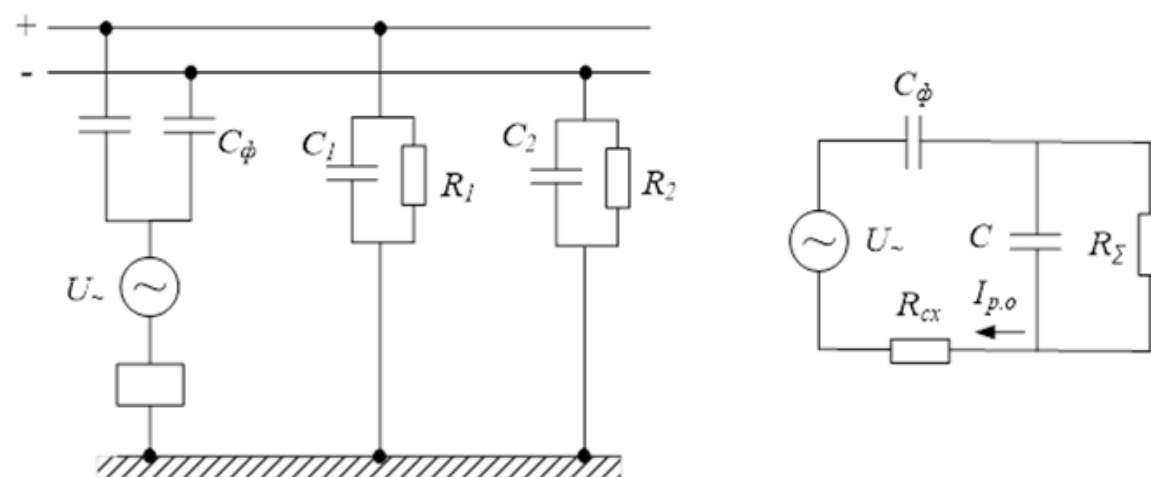


Рисунок 3 – Схема: а) заміщення мережі; б) розрахункова схема визначення струму

Аналіз існуючих методів і засобів контролю ізоляції в розподільних мережах постійного струму

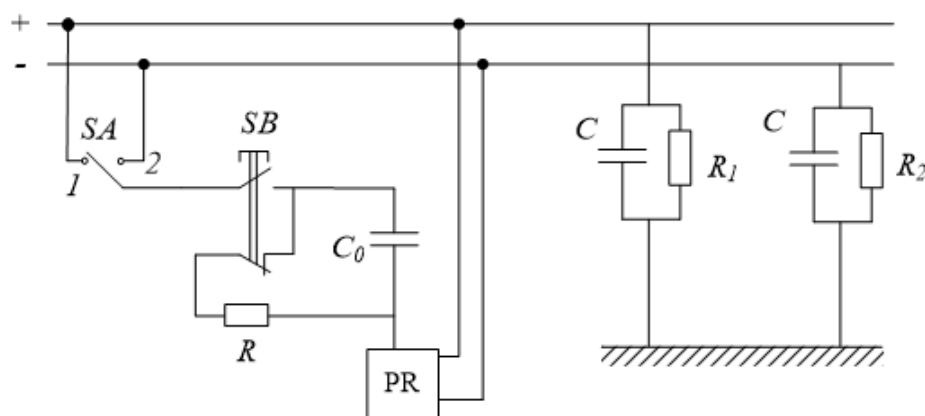


Рисунок 1.2 – Схема заміщення пристрою для вимірювання омичного опору полюсів мережі постійного струму відносно землі

Дослідження існуючих методів і засобів захисного вимикання

Таблиця 1.1 – Найбільш допустимі напруги дотику $U_{д.т.}$ і струми $I_{н.}$, що протікають через тіло людини у разі небезпечного режиму роботи електроустановки постійного струму

Рід струму	Нормована величина	Тривалість дії, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Понад 1,0
Постійний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
Випрямлений двопівперіодний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	-
Випрямлений однопівперіодний	$U_{д.т.}, В$ $I_{н.}, мА$	650	500	400	300	250	200	190	180	170	60	150	15

Дослідження існуючих методів і засобів захисного вимикання

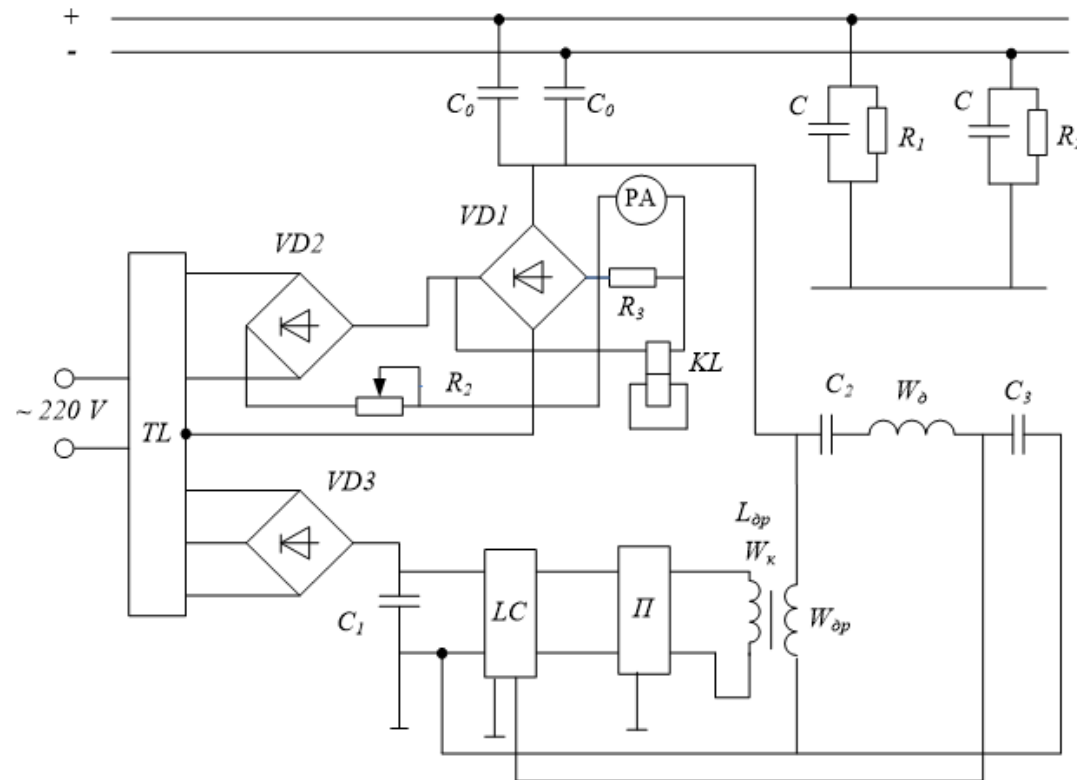


Рисунок 1.4 – Принципова схема УЗО

Для ліквідації залишкового струму в обмотці реле KL, викликаного втратами в дроселі через діоди випрямляча VD1, через випрямляч VD2 пропускається струм, який регулюється резистором R2. Це забезпечує відкривання всіх діодів моста VD1, і струм у реле визначатиметься різницею між струмом у першій обмотці трансформатора TL та струмом, що проходить через діод у зворотному напрямку. Короткозамкнута обмотка застосовується для зменшення впливу перехідних процесів.

Реалізація оптимальної функціональної характеристики пристрою від витікання струму

Двопровідну мережу постійного струму розглядатимемо як систему, що виконує перетворення вхідного сигналу у вихідний. Вхідним параметром у цьому випадку приймається напруга $U_0 = \text{const}$ джерела постійного струму, а вихідним сигналом – струм що проходить через тіло людини, розглядатиметься як результат утворення шунтуючого замикання. Враховуючи, що гранична ситуація відповідає контакту людини з певним опором R_h , тоді [5], струм через тіло людини може бути визначений як

$$i_h(t) = \frac{U_0 R_1}{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)} \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_h (R_1 + R_2)} \exp \left[-\frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{2 C_1 R_1 R_2 R_h} t \right] \right), \quad (2.1)$$

Для реалізації третьої ділянки оптимальної функціональної характеристики (ОФХ) контролюються величина та ступінь асиметрії ізоляції полюсів мережі.

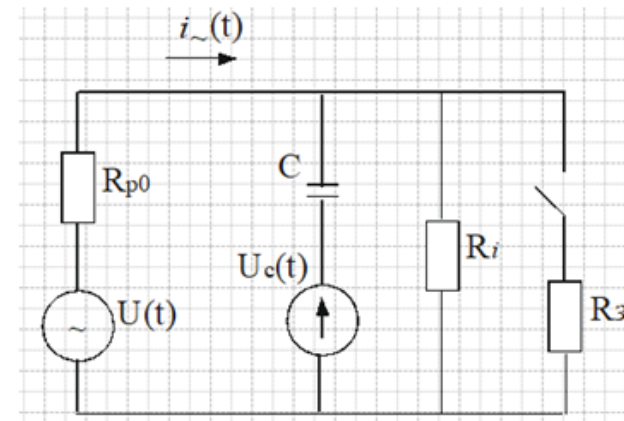
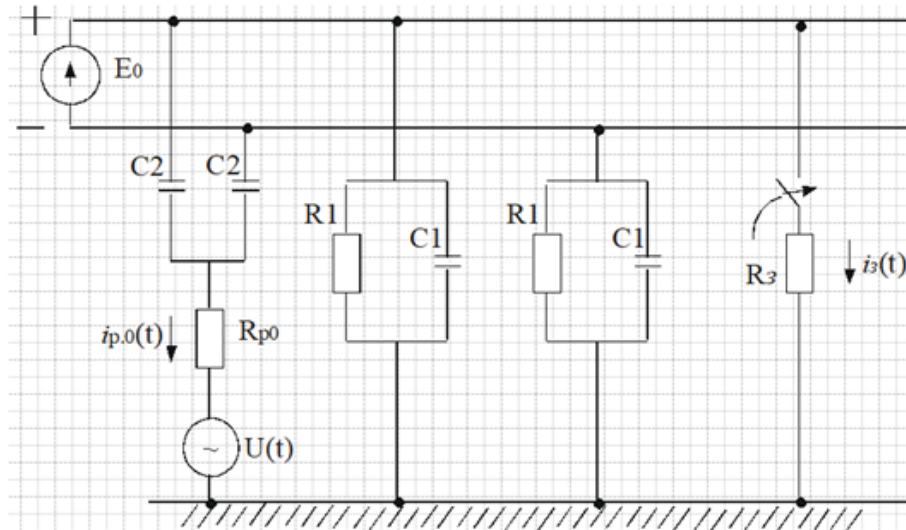


Рисунок 1.5 – Заступна схема комбінованого методу контролю струму витікання: а) розрахункова схема визначення струмів під дією напруги мережі; б) під дією джерела змінного струму

Вдосконалення методів для визначення опору ізоляції полюса мережі відносно землі

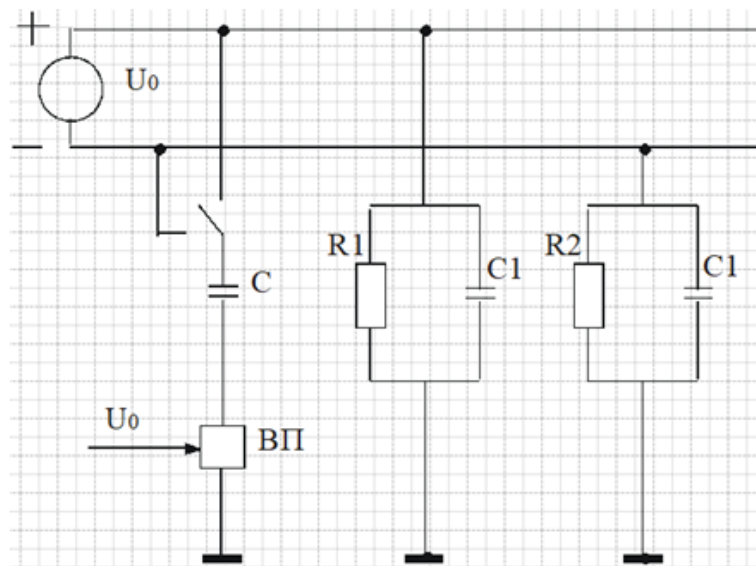


Рисунок 1.5 – Заступна схема пристрою для визначення опору ізоляції полюсів мережі відносно землі

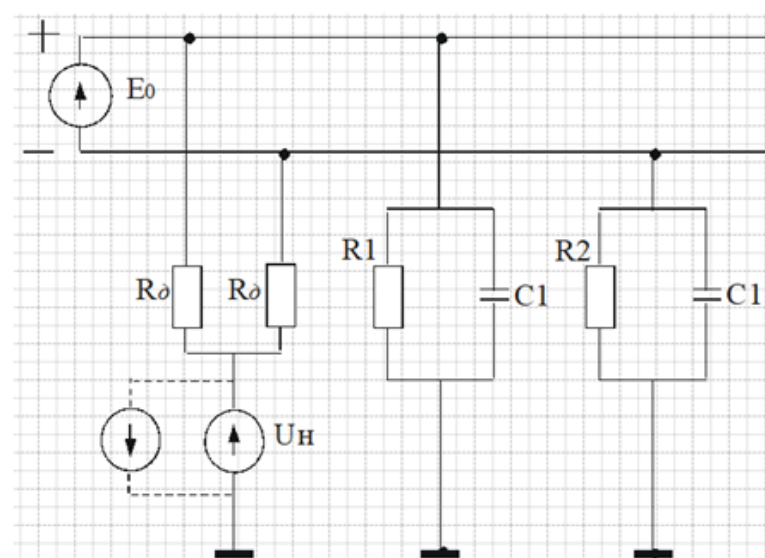


Рисунок 1.6 – Розрахункова схема методу контролю ізоляції в двопровідній мережі постійного струму

Використання цього методу дає змогу усунути вплив ємності мережі та асиметрії опору ізоляції на результати вимірювань. Метод дозволяє розраховувати опір ізоляції як окремих полюсів, так і в цілому відносно землі.

Доведено, що зміни технічного стану ізоляції окремих елементів системи електропостачання (СЕП) викликані утворенням шунтових зв'язків між струмопровідними частинами мережі та землею. Під впливом перенапруг відбувається різке зниження активного опору цих шунтових шляхів, тоді як плавне змінення опору пов'язане з впливом зволоження. Динамічна характеристика активного опору ізоляції мережі відносно землі є важливим інформативним показником для діагностики несправностей ізоляції окремих компонентів неруйнівними методами

Розробка пристрою для періодичного контролю ізоляції в двопровідних мережах постійного струму

Схема принципового пристрою наведена на рис. 3.1. Для підготовки приладу до роботи при натиснутій кнопці його затискачі підключаються до контрольованої мережі постійного струму, а інші затискачі — до мережі змінного струму 220 В, 50 Гц.

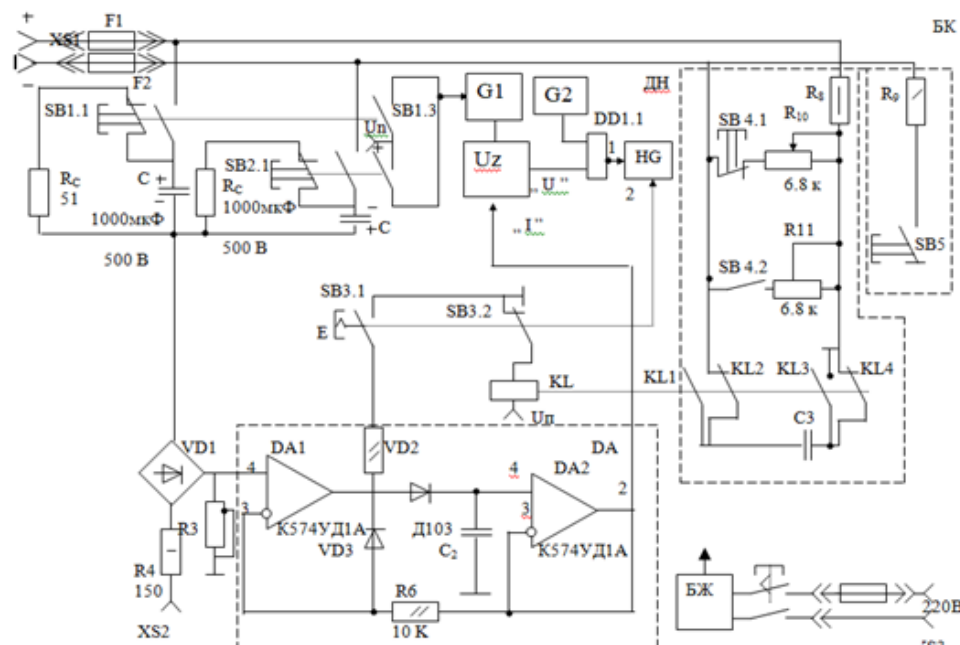


Рисунок 3.1 Принципова схема пристрою
періодичного контролю ізоляції

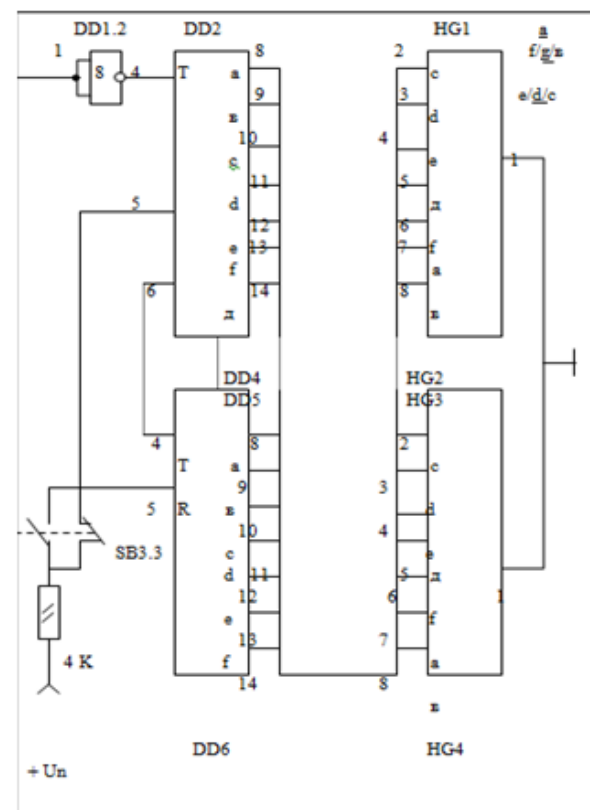


Рисунок 3.2 Блок сигналізації

Рисунок 3.3 Схеми перетворювача

Алгоритм та схема функціонування пристрою захисного вимикання в мережах постійного струму

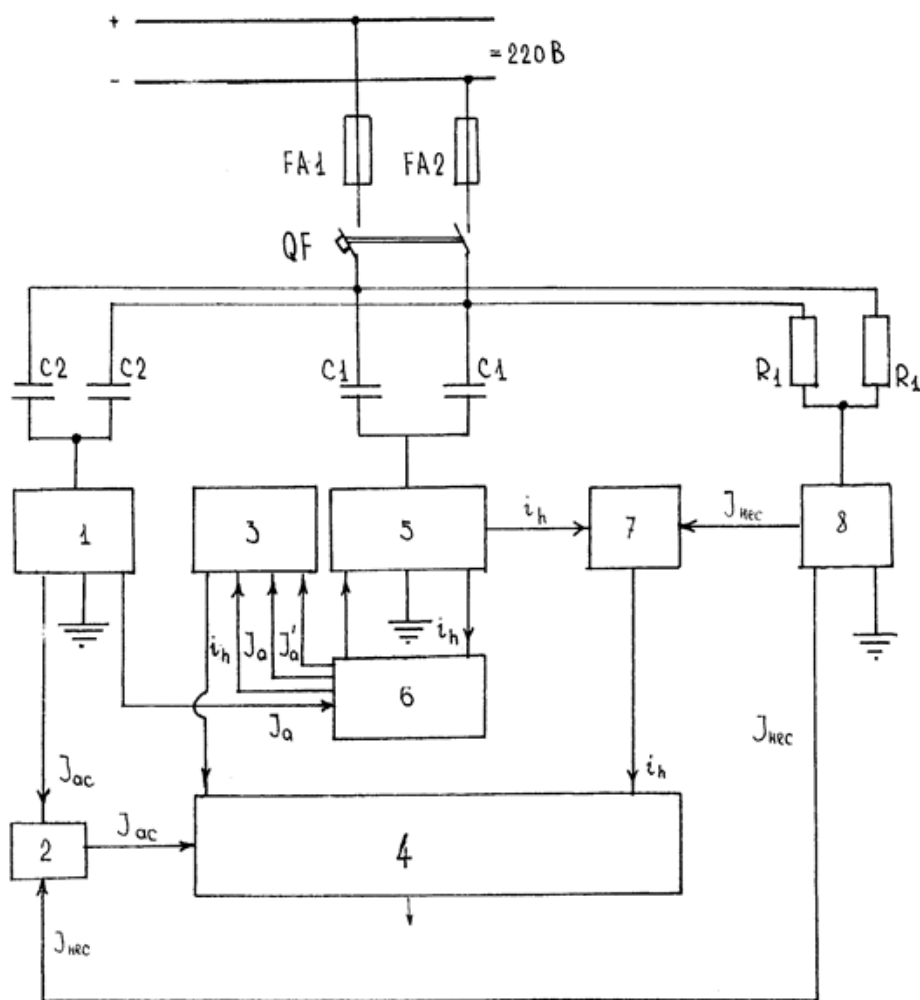


Рисунок 3.4 – Блок-схема пристрою захисту

На рисунку представлені наступні позначення: 1 – блок для виділення активної складової струму; 2, 7 – логічні елементи; 3 – блок обчислення; 4 – виконавчий механізм; 5 – блок контролю величини перехідного струму в зоні замикання; 6 – блок керування; 8 – блок контролю несиметрії.

Основними складовими цієї схеми є ємнісні дільники C1 і C2, а також омичний дільник напруги R1; блок виділення активної компоненти струму (1); логічні елементи (2, 7); обчислювальний блок (3); виконавчий механізм (4); блок контролю перехідного струму (5); керуючий блок (6); а також блок контролю асиметрії напруг полюсів відносно землі (8)

Алгоритм та схема функціонування пристрою захисного вимикання в мережах постійного струму

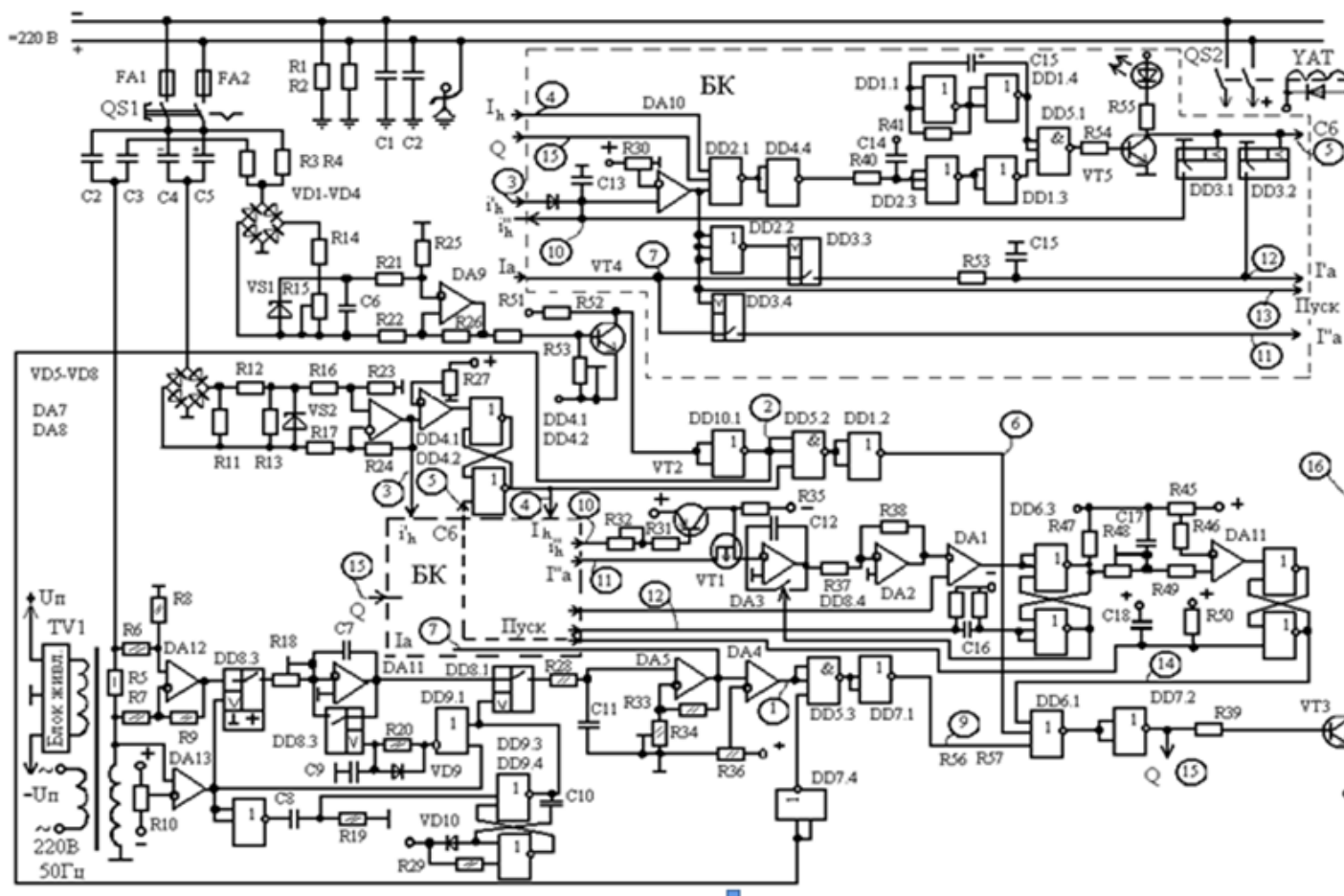


Рисунок 3.5 – Принципова схема захисту від витікання струму на землю в дво провідній мережі постійного струму

Принципова схема блоку виділення активної складової струму витікання на землю

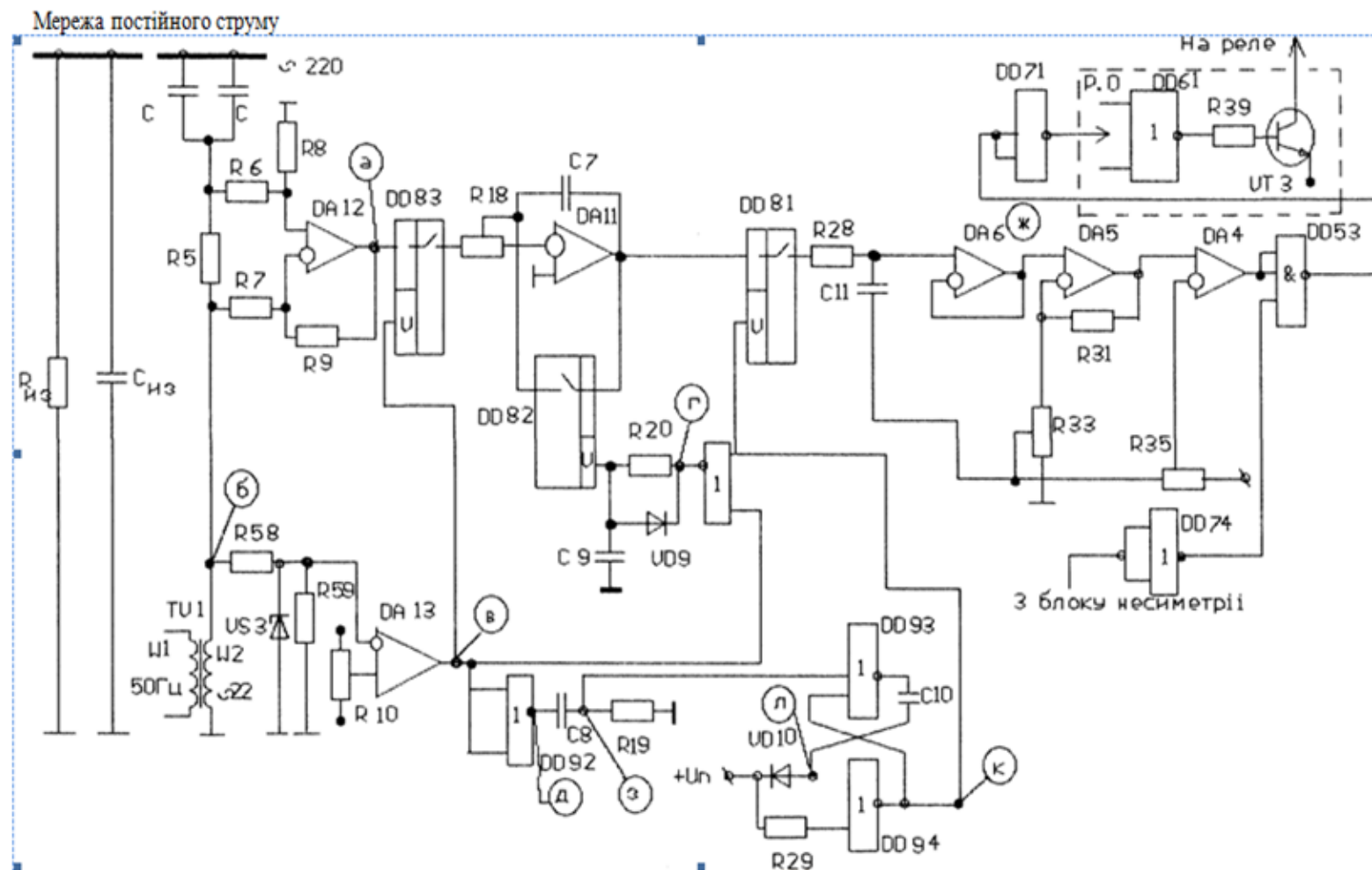


Рисунок 3.6 – Принципова схема блоку виділення активної складової струму витікання на землю

Пристрій захисного вимикання в мережах постійного струму

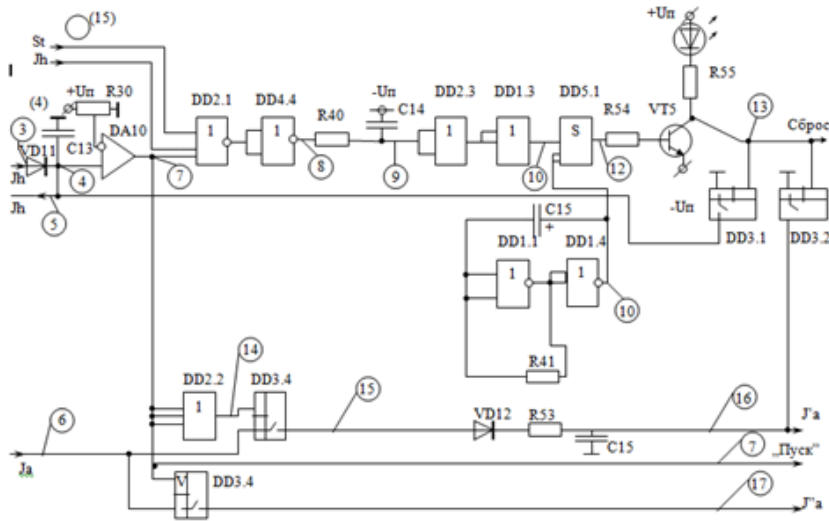


Рисунок 3.9 – Принципова схема блока контролю керування і комутації елементів схеми ПЗВ

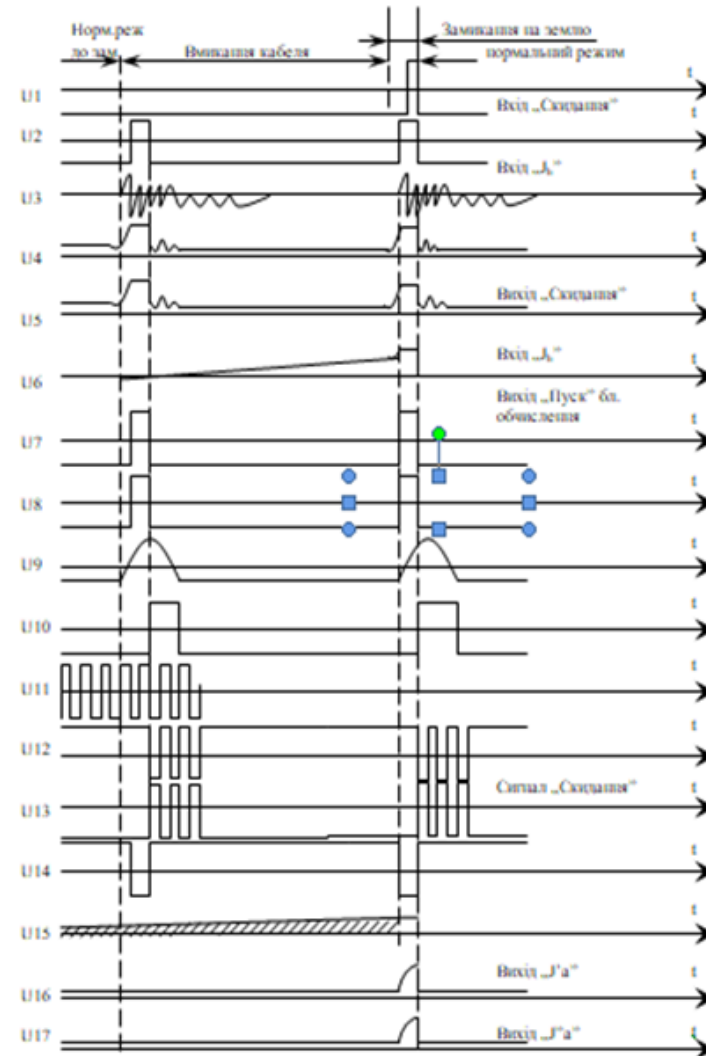


Рисунок 3.10 – Осцилограма напруг в контрольованих вузлах блока керування комутації елементів схеми ПЗВ

Пристрій захисного вимикання в мережах постійного струму

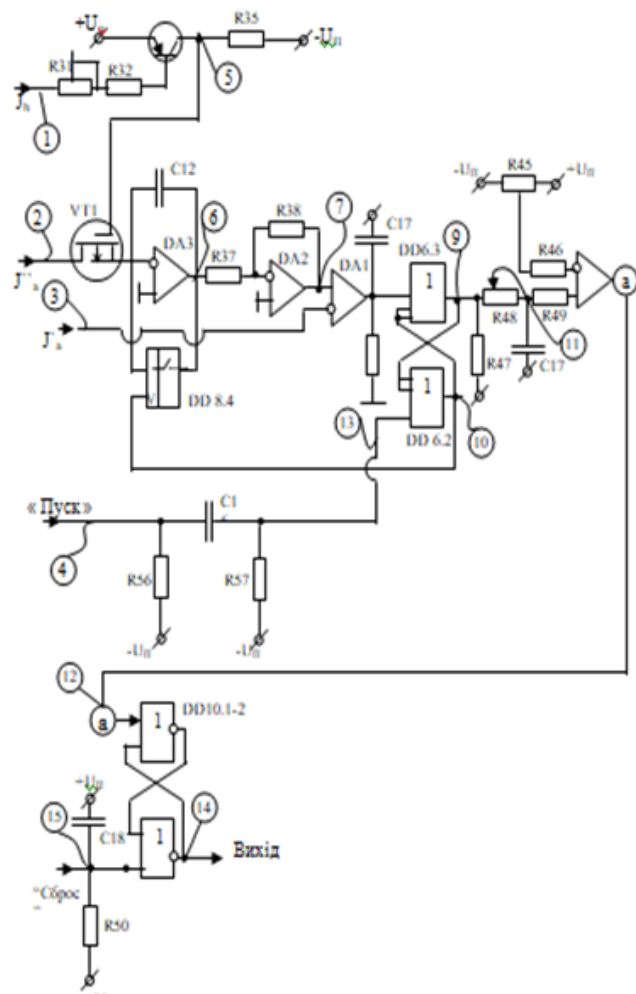


Рисунок 3.11 – Схема електрична принципова блока обчислення струму через місце замикання на землю в сталому режимі

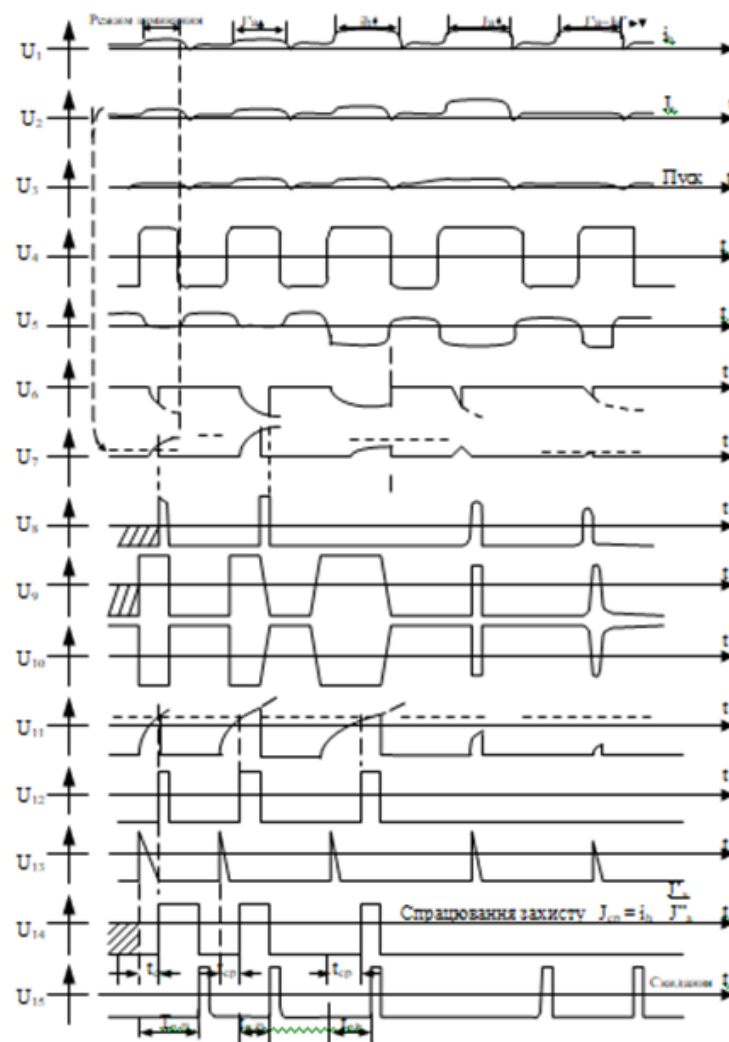


Рисунок 3.12 – Осцилограма напруги в контрольованих вузлах блока обчислень

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження отримано кілька важливих науково-практичних результатів:

1. Вдосконалення захисної характеристики пристрою: Покращена захисна характеристика пристрою захисного вимикання в двопровідній мережі постійного струму, що дозволяє визначати струм через шунтувальний зв'язок між полюсом мережі та землею, використовуючи змінний струм промислової частоти з автоматичною компенсацією ємності мережі відносно землі. Вимірювання реактивної складової струму порівнюється з нормативними значеннями як в перехідному, так і в сталому режимах роботи.

2. Точність методу контролю омичного опору ізоляції: Доведено, що точність контролю омичного опору ізоляції залежить від співвідношення між фільтраційною ємністю приєднаного пристрою та ємністю мережі. У найгіршому випадку, коли відносна похибка компенсації ємності мережі досягає 10%, максимальна ємність мережі становить 20 мкФ, методична похибка контролю ізоляції не перевищує 10%, а для окремого приєднання — не більше 4%.

3. Покращення точності визначення омичного опору: Для підвищення точності визначення омичного опору ізоляції полюсів у двопровідній мережі постійного струму запропоновано застосовувати комбінацію динамічних та статичних характеристик вимірювального процесу. Це дозволяє зменшити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибки, викликані коливаннями напруги та зміною навантаження.

4. Удосконалення методу періодичної перевірки опору ізоляції: Запропоновано метод періодичної перевірки опору ізоляції полюсів, де омичний опір визначається як відношення напруги живлення до максимального значення зарядного струму конденсатора, перемикаємого між полюсом мережі і землею. Доведено, що цей метод дозволяє мінімізувати похибки вимірювання, зменшуючи вплив ємності мережі, перехідних процесів при зміні навантаження і часу вимірювань.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струму на землю в двопровідних мережах постійного струму..

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism **12,86%**

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Кутін В.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Власенко О.М.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БДР.004.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Покращення характеристики спрацювання захисту від витікання струму на землю в двопровідних мережах постійного струму	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Власенко О.М.		20.05				
Перевірів		Кутін В.М.		20.05				
Т. контр.								
Норм. кон.				23.05		ВНТУ, гр. ЕМСА-216		
Затверд.		Мошноріз М.М.		23.05				