Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

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

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-21б
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)
Дмитро ОСАДЧУК
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК
Василь КУТІН
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)
« 09 » червня 2025 р.

Рецензент:
Терешкевич Л. Б.
(прізвище та ініціали)
« 10 » червня 2025 р.

Допущено до захисту
Зав. кафедри
« 03 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

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 МОШНОРІЗ

"18" лютого 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Осадчуку Дмитру Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Методи та засоби діагностики релейного захисту електрообладнання

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

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Загальна характеристика пристрою релейного захисту та автоматики (РЗА) як об'єкта діагностування. Види пошкоджень елементів РЗА, нові моделі електромеханічних і мікроелектронних пристроїв РЗА, методика оптимізації програм діагностування пристроїв РЗА з використанням різних критеріїв, теоретичні аспекти побудови вмонтованих засобів функціонального і тестового діагностування пристроїв РЗА, реалізованих як на електромеханічних так і на мікроелектронній та мікропроцесорній елементних базах.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Загальна характеристика засобів РЗА. Особливості побудови мікропроцесорного захисту. Види несправностей засобів РЗА. Аналіз існуючих методів і засобів перевірки технічного стану РЗА. Вдосконалення методів і засобів діагностування РЗА. Побудова діагностичної моделі РЗА. Особливості побудови багатоступеневого пристрою РЗА. Структурні моделі побудови мікропроцесорного захисту РЗА .Синтез тестів для діагностування РЗА. Алгоритмічний метод побудови тестів, що дозволяють виявити логічні несправності елементів РЗА. Синтез вмонтованих засобів діагностування. Приклад синтезу дистанційного захисту ліній електропередачі. Оптимізація програми діагностування. Охорона праці. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Структурна схема РЗА. Функціональна схема мікропроцесорного реле. Діагностичні моделі РЗА. Функціональна схема багатоступеневого РЗА. Вибір контрольних точок в РЗА. Діагностування РЗА враховує елемент часу. Структурна модель мікропроцесорного пристрою .Син тестів для діагностування РЗА. Алгоритмічний метод побудови тестів РЗА. Прик реалізації D алгоритма. Оптимізація програми діагностування РЗА. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	викона прийн
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 18.02.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
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	19.06.2025	вик

Студент _______ (підпис) Д.А. Осадчук (прізвище та ініці

Керівник роботи _______ (підпис) В.М. Кутін (прізвище та ініц

АНОТАЦІЯ

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

В бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядаються пристрої РЗА як об'єкт діагностування, нові моделі електромеханічних і мікроелектронних пристроїв РЗА, методика оптимізації програм діагностування пристроїв РЗА з використанням різних критеріїв, теоретичні аспекти побудови вмонтованих засобів функціонального і тестового діагностування пристроїв РЗА, реалізованих як на електромеханічних так і на мікроелектронній та мікропроцесорних елементних базах.

Ключові слова: вдосконалення, релейний захист, діагностичні моделі оптимізація програм діагностування, надійність.

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.

The bachelor's qualification work considers relay protection devices as an object of diagnostics, new models of electromechanical and microelectronic relay protection devices, a methodology for optimizing relay protection device diagnostics programs using various criteria, theoretical aspects of building embedded tools for functional and test diagnostics of relay protection devices, implemented both on electromechanical and microelectronic and microprocessor element bases.

Keywords: improvement, relay protection, diagnostic models, optimization of diagnostic programs, reliability.

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність теми. Головною функцією релейного захисту та автоматики (РЗА) є запобігання виникненню аварійних ситуацій і відхилень у роботі енергосистем. Іншими словами, РЗА відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної та безперебійної роботи електроенергетичної мережі.

Рівень надійності роботи РЗА значною мірою визначається тим, наскільки ефективно організоване її профілактичне обслуговування, а також дії після виникнення аварій.

Сучасні РЗА-системи стають дедалі складнішими, а їх кількість постійно зростає. У зв'язку з цим надзвичайно важливо впроваджувати дієвий контроль технічного стану обладнання на всіх етапах: від проектування та виробництва до безпосередньої експлуатації.

Під час експлуатації таких систем варто прагнути до скорочення часу, необхідного на перевірку технічного стану, зменшення витрат на відповідне обладнання, оптимізації кількості персоналу для обслуговування та мінімізації ресурсів, що витрачаються на виявлення несправностей.

Досягнення підвищеної ефективності в обслуговуванні систем релейного захисту та автоматики (РЗА) можливе завдяки впровадженню нових підходів і технічних рішень. Центральне місце в цій концепції посідає програмно-апаратний комплекс технічного обслуговування (ПАК).

Створення такого комплексу передбачає формування математичної моделі функціонування пристроїв РЗА, вибір підходів до її аналізу та синтезу, розробку оптимальних діагностичних програм і визначення принципів побудови апаратних компонентів для діагностування.

Інтеграція діагностичних технологій у сучасну РЗА-інфраструктуру потребує вирішення ряду ключових завдань, зокрема — підготовки фахівців відповідної кваліфікації, а також технічного оснащення підприємств-розробників і виробників відповідними мікропроцесорними засобами.

Невтрачену актуальність має питання забезпечення діагностики вже на етапах проектування мікроелектронних та мікропроцесорних РЗА-пристроїв.

Організація діагностування стану пристроїв на основі оцінки їх технічного стану також залишається відкритим завданням. Потреба у проведенні теоретичних досліджень і створенні ефективних алгоритмів прогнозування технічного ресурсу з урахуванням результатів періодичної та безперервної діагностики є нагальною.

На світовому ринку вже представлено низку високотехнологічного діагностичного обладнання від провідних виробників — таких як Micro Craft (Японія), Check-Sum, CenRed (США), Polar (Велика Британія), Граніт (РФ), Seico (Італія), яке дозволяє ефективно виявляти несправності у складних РЗА-системах.

У межах бакалаврської кваліфікаційної роботи досліджуються пристрої РЗА як об’єкти діагностики, аналізуються сучасні моделі електромеханічних та мікроелектронних елементів, розробляється методика оптимізації діагностичних програм із застосуванням різних критеріїв, а також розглядаються теоретичні засади побудови вбудованих систем функціонального і тестового діагностування для пристроїв, створених як на основі електромеханіки, так і з використанням мікроелектронної та мікропроцесорної бази.

Мета роботи: Покращення показників надійності, безвідмовної роботи та тривалого ресурсу пристроїв релейного захисту та автоматики забезпечується шляхом удосконалення методів діагностики, розробки ефективних тестових процедур і оптимізації діагностичних програм.

Об’єкт діагностування – процеси зміни технічного стану засобів РЗА і автоматики.

Предмет дослідження: вдосконалення методів і засобів діагностики релейного захисту та автоматики.

Поставлена мета потребує вирішення таких науково-технічних задач:

– Аналіз статичних і динамічних параметрів аварійних режимів у розподільних електричних мережах та оцінка ефективності існуючих методик і пристроїв для визначення місця пошкодження (ВМП);

– Теоретичне обґрунтування нового підходу до локалізації пошкоджень і розробка алгоритмічного забезпечення процесу ВМП в умовах неоднорідності розподільчих мереж;

– Удосконалення дистанційного методу визначення місця пошкодження в повітряних розподільчих мережах із урахуванням конструктивної, топологічної та режимної неоднорідності;

– Розробка принципової схеми системи вимірювання, призначеної для реалізації дистанційних способів локалізації пошкоджень;

– Оцінка ефективності реалізації процесу визначення місця пошкодження в реальних умовах експлуатації.

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)».

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

До питання автоматизації процесу пошуку пошкоджень в електричних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 10кВ/ Д.А. Осадчук, В.М. Кутін – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», Вінниця, 2025. [Електронний ресурс]. URL:. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 3 с.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальна характеристика засобів РЗА (relay protection and automation)

Пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА) складаються з окремих функціональних елементів, що взаємодіють між собою в межах загальної структурної схеми [6, 7]. Кожен елемент виконує роль перетворювача вхідних сигналів, які надходять від попередніх етапів, та забезпечує їх подальшу передачу до наступного елемента. У межах кожного пристрою ці елементи формують функціональні блоки. Згідно з логікою послідовного оброблення сигналів, умовно виділяють чотири основні частини: вимірювальну, логічну, виконавчу та сигнальну (див. рисунок 1.1).

Вимірювальна частина призначена для контролю параметрів, що характеризують режим функціонування захищуваного об’єкта. До таких параметрів належать: амплітуда, миттєве або діюче значення струму й напруги, абсолютне значення, частота, а також кут зсуву фаз між струмом і напругою.

Ці дані надходять від первинних вимірювальних трансформаторів напруги й струму та вважаються інформаційними параметрами. Вторинні значення напруги й струму є основними джерелами вхідних сигналів, які можуть бути як аналоговими, так і дискретними.

Вимірювальний блок може включати кілька органів, що діють безперервно або за принципом релейного реагування. Релейні елементи перетворюють аналогові сигнали у дискретну форму з двома можливими станами інформаційної змінної. Сигнали на виході з’являються лише за умови, що вхідні дані відповідають визначеним критеріям, які свідчать про технічний стан об'єкта, що перебуває під захистом.

Логічний орган формує керуючий сигнал залежно від кількості, послідовності та комбінації вхідних сигналів, що надходять на його входи.

Логічна частина складається з набору логічних елементів, у результаті чого поява дискретного сигналу на виході обумовлена певною сукупністю вхідних впливів. Основу логічної обробки становлять три базові логічні операції: "АБО", "І", "НЕ". У загальному випадку структура логічної частини може бути доволі складною, а її ефективна реалізація базується на принципах математичної логіки та логічного моделювання.

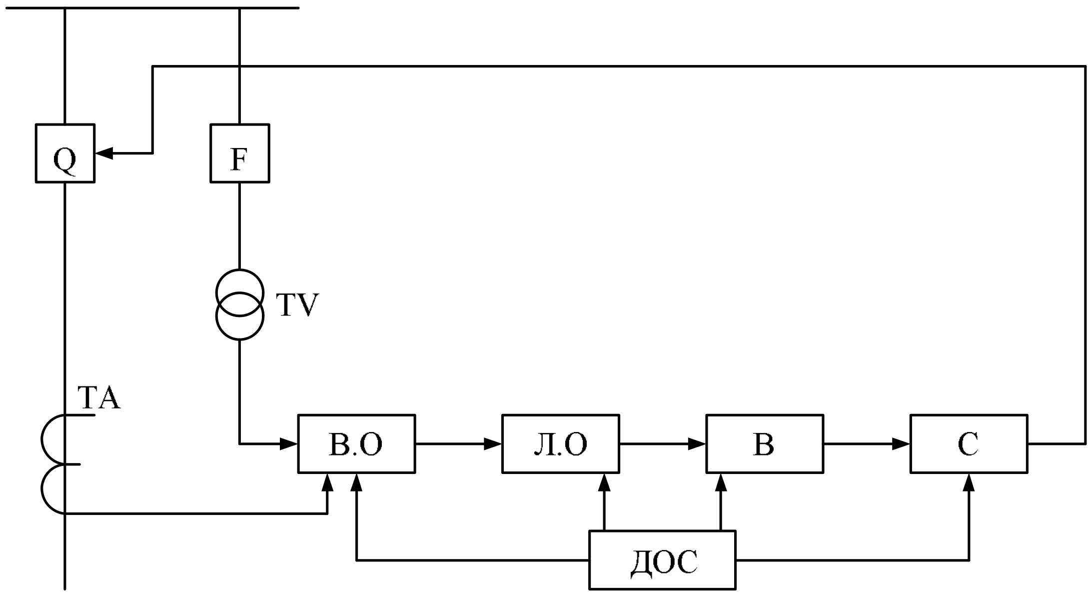


Рисунок 1.1 – Структурна схема релейного захисту: ВО – вимірювальний орган; Л.О. – Логічний орган; В – виконавчий орган; С – Сигнальний орган; ДОС – джерело оперативного струму

Вихідні сигнали релейного захисту представлені дискретними командами на включення або вимкнення вимикачів захищуваного об’єкта. Ці сигнали генеруються виконавчими пристроями, які можуть бути потужними електромеханічними реле або тиристорними ключами. Виконавчі елементи систем релейного захисту, автоматики, а також систем телевимірювання і телесигналізації застосовуються для передачі інформації до електронно-обчислювальних машин та відображення необхідних даних для персоналу, що здійснює оперативне керування. До таких пристроїв належать засоби звукової, світлової та інших типів сигналізації.

У системах телемеханіки, а іноді й у релейному захисті та автоматизації, часто виникає потреба в передачі сигналів на великі відстані. Для цього застосовується передавальна частина пристроїв, ключовим елементом якої є канал зв’язку.

Джерело оперативного струму (ДОС) забезпечує генерацію сигналів оперативної інформації. До таких джерел можуть належати постійний або змінний струм, що надходить від трансформатора струму (TA), трансформатора напруги (TV), акумуляторної батареї, попередньо зарядженого конденсатора, трансформатора власних потреб із випрямлячем, а також їх різні комбінації.

У процесі експлуатації систем захисту можливі ситуації, коли вони не виконують покладені на них функції: або не реагують на пошкодження в межах зони відповідальності (невизначена відмова), або ж спрацьовують без наявності пошкодження, наприклад, при зовнішніх коротких замиканнях (хибна відмова).

Всі несправності в роботі релейного захисту та автоматики (РЗА) відносяться до відмов у його функціонуванні. Для мінімізації таких відмов захист повинен відповідати ряду ключових вимог: бути селективним, забезпечувати швидке реагування, мати стійкість роботи (високу чутливість) та гарантувати надійність функціонування.

1.2 Особливості побудови мікропроцесорного захисту

Розглянемо особливості структури мікропроцесорного інтегрованого релейного захисту. У цьому випадку змінюється традиційний поділ автоматичних пристроїв на функціональні блоки — сенсорний, вимірювальний, логічний та виконавчий. Оскільки мікропроцесори виконують логічні операції, вимірювальна та логічна частини об’єднуються в один обчислювально-логічний блок (ОЛЧ). До вимірювально-перетворюючої частини (ВПЧ) входять як аналогові, так і програмні перетворювачі, які аналізують параметри режиму єдиної енергетичної системи. Крім того, виділяють передавальну інформаційну частину (ПІЧ) та виконавчий блок (ВЧ) [7, 8, 9].

Обчислювально-логічна частина (див. рисунок 1.2) включає сигнальні мікропроцесори типів МПІ-МПЛ та мікроконтролери (МК). За допомогою програмного забезпечення ці мікропроцесори виконують такі функції:

- виділення вихідних сигналів автоматичних пристроїв, включаючи стабілізовані значення промислової частоти струму та напруги, а також перехідні процеси;
- додаткову обробку сигналів, що надійшли від трансформаторів струму і напруги, шляхом фільтрації за допомогою програмних частотних фільтрів, які усувають залишкові перешкоди (аперіодичні та коливальні складові гармонік), які не були повністю відфільтровані аналоговими низькочастотними фільтрами (ФНЧ);
- розкладання вхідних сигналів на ортогональні та симетричні компоненти;
- перетворення аналогових інформаційних параметрів — амплітуди, фази, частоти — у цифрову форму;
- формування цифрових сигналів, що характеризують активну та реактивну потужність керованого електроенергетичного об’єкта, а також комплексний опір (ВППС) на ділянках ліній електропередачі високої та надвисокої напруги в місцях можливого виникнення коротких замикань;
- генерацію цифрових сигналів, які відображають кути зсуву фаз між еквівалентними електрорушійними силами (ЕРС) на кінцях лінії електропередачі, їх частоти (ВПФЧ), а також різницю частот обертання частин єдиної енергетичної системи, що втратили синхронізацію, включаючи показники їх взаємного ковзання та швидкості зміни цих параметрів.

Мікроконтролери (МК) за допомогою програмного забезпечення реалізують логічні алгоритми, що забезпечують роботу інтегрованого мікропроцесорного релейного захисту та автоматики.

Вимірювально-перетворююча частина (ВПЧ) включає такі компоненти:

- вторинні перетворювачі вхідних даних типу TVL та TAL;
- пасивні резисторно-конденсаторні (RC) аналогові фільтри низьких частот (ФНЧ), які пригнічують вільні коливання та гармонійні складові напруги і струму з частотами понад 250 Гц, необхідні через періодичний характер роботи цифрових програмних фільтрів;
- оптоелектронні пристрої гальванічної розв'язки (ЕГР), що відокремлюють аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) і мікропроцесори (МП) від аналогових вхідних кіл;
- керований перемикач вхідних аналогових сигналів, що мультиплексує дані для одного аналого-цифрового перетворювача (АПП) — мультіплексор (МПЛ);
- аналогово-дискретний перетворювач (АДП) вхідної напруги, який формує сигнали та керує запуском і виконанням програми перетворення;
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- електромагнітні реле для обробки вхідних дискретних сигналів — РВС;
- клавіатуру для керування мікропроцесором;
- задаючі елементи (ЗЕ), які служать для налаштування вимірювальних органів програмних автоматичних пристроїв.

Апаратно-виконавча частина програмних автоматичних пристроїв забезпечує формування керуючих сигналів і включає:

- неперервні керуючі дії (НКД), які реалізуються через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП);
- часові імпульсні дії (ЧІД), що формуються за допомогою часово-імпульсного формувача (ЧІФ);
- цифрові фазо-імпульсні дії (ЦФІД), які генеруються формувачем фазо-імпульсних керуючих дій (ФІКД);
- дискретні керуючі дії (ДКД), виконувані набором електромагнітних реле (ДКД).

До виконавчої частини також входять засоби відображення інформації, серед яких:

- алфавітно-цифровий індикатор (АЦІ);
- дисплей (ДП);
- світлодіодні індикатори (СДІ).
- передавальна інформаційно-функціональна частина (ПІЧ) включає інтерфейси для зв’язку з персональними електронно-обчислювальними машинами (ПЕОМ), волоконно-оптичними лініями передачі даних, а також з автоматизованими системами керування.

Електромеханічні пристрої релейного захисту є найдавнішим типом захисного обладнання. Вони функціонують на основі взаємодії електромагнітного поля з механічними компонентами, що робить їх конструкцію простою, а також забезпечує високу надійність і стійкість до зовнішніх електромагнітних перешкод. Такі пристрої легко обслуговувати, вони зрозумілі для персоналу і можуть ефективно працювати протягом багатьох років. Водночас вони мають певні суттєві недоліки: великі розміри, невисоку швидкодію, обмежену точність, відсутність гнучких можливостей налаштування та обмежений функціонал. Через це електромеханічні пристрої вважаються морально застарілими і не відповідають сучасним вимогам щодо швидкості реакції та селективності роботи.

Напівпровідникові пристрої, що базуються на аналогових електронних компонентах, відзначаються меншими розмірами та вищою точністю порівняно з електромеханічними аналогами, а також мають нижче енергоспоживання. Водночас вони мають свої недоліки: підвищену чутливість до зовнішніх умов, обмежені можливості розширення функціоналу, а процес діагностики потребує спеціалізованого обладнання та є досить складним. Незважаючи на те, що такі пристрої стали важливим кроком на шляху до сучасних систем, їх використання поступово зменшується.

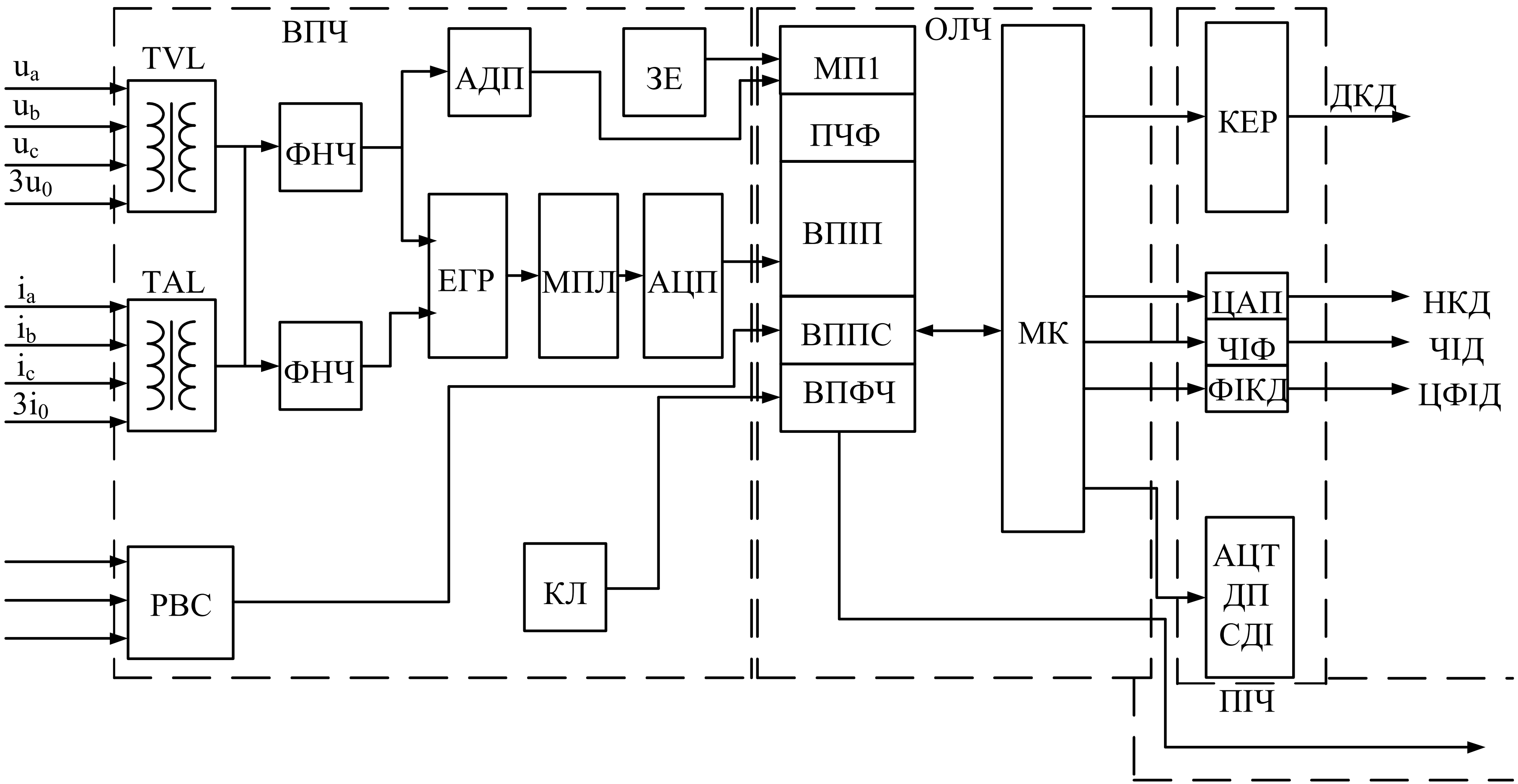


Рисунок 1.2 – Функціональна схема мікропроцесорного захисту

Мікропроцесорні пристрої представляють собою новітній етап розвитку систем релейного захисту та автоматики. Вони засновані на цифровій обробці сигналів із застосуванням мікропроцесорів або мікроконтролерів для виконання захисних алгоритмів. Ці прилади вирізняються високою точністю та швидкістю реагування, а також дають змогу впроваджувати широкий спектр функцій — від безпосереднього захисту до автоматизації, вимірювань, фіксації аварійних подій і дистанційного управління. Основною перевагою є їхня гнучкість у налаштуванні, можливість оновлення програмного забезпечення і легка інтеграція з цифровими енергетичними мережами через сучасні протоколи зв’язку. Водночас такі системи потребують кваліфікованих спеціалістів, стабільного джерела живлення, ретельного налаштування та заходів кібербезпеки. Необхідно також враховувати вищі витрати на впровадження, особливо під час модернізації існуючих підстанцій. Сучасні мікропроцесорні рішення повністю відповідають вимогам для середньовольтних мереж, особливо в діапазоні 0,4–10 кВ, і вважаються оптимальним варіантом для цього класу напруги.

Недоліки та переваги наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1-Недоліки та переваги пристроїв РЗА на мікропроцесорній базі.

Показник	**Електромеханічні**	**Мікроелектронні**	**Мікропроцесорні**
Точність вставок	Низька, потрібні додаткові вимірювальні прилади	Низька (крім продуктів Останнього десятиліття), Потрібні додаткові Вимірювальні прилади	Висока, додаткові Вимірювальні прилади не вимагаються
Характеристики спрацьовування	Великий розкид характеристик, низький коефіцієнт повернення	Більш точні характеристики і більш високий коефіцієнт повернення, що дозволяє зменшити вставки по струму, напрузі, часу	Практично не мають розкиду характеристик, високий коефіцієнт повернення, що дозволяє зменшити значення вставок захистів
Споживання	Велике	Середнє	Низьке
Діапазон уставок	Малий, є модифікації з різними діапазонами виміру	Більший, тому потрібно менше число модифікацій	Великий, не потрібні модифікації з різними діапазонами виміру
Стійкість до завад	Пристрої завадостійкі	Пристрої недостатньо завадостійкі, вимагаються заходи для підвищення завадостійкості	Пристрої завадостійкі в межах норм МЕК
Трудозатрати на обслуговування	Високі, відсутність убудованих функцій контролю	Середні, за рахунок убудованого тестового і функціонального контролю, але він недостатній	Низькі, за рахунок повного автоматичного самоконтролю
Швидкодія	Низька	Середня, висока	Висока
Реєстратор	Відсутній	Відсутній	Є у більшості пристроїв
Контроль силового устаткування	Відсутній	Відсутній, крім продуктів останнього десятиліття.	Є у більшості пристроїв
Обмін інформацією	Відсутній	Відсутній	Є у більшості пристроїв
Індикація	Тільки спрацьовування	Індикується тільки спрацьовування захистів. У продуктах останніх десятиліть індикується робота РЗА, положення вимикача, інформація про КЗ на цифровому індикаторі.	Використовується РКІ, де індикуються вставки, параметри аварійного і нормального режимів, результати самодіагностики й ін.

Варто також підкреслити, що цифрові реле мають здатність автоматично коригувати налаштування релейного захисту. Це відбувається, наприклад, при різких змінах режиму живлення мережі або під час виведення обладнання на ремонт (зміни можуть виконуватись через дискретні входи або віддалено — через локальну мережу).

Застосування енергонезалежної пам'яті дозволяє точно вводити і коригувати параметри вставок захисту і автоматики без необхідності використання спеціалізованих вимірювальних пристроїв. На відміну від електромеханічних та мікроелектронних аналогів, цифрові реле підтримують широкий діапазон вставок і не вимагають змін для обробки вхідних аналогових сигналів. Крім того, характеристики спрацювання у них мають мінімальний розкид, а завдяки високому коефіцієнту повернення значення вставок за струмом, напругою та часом знижуються. Використання енергонезалежної пам'яті також дало змогу впровадити програмний модуль, який записує вхідні струми і напруги, а також фіксує послідовність спрацьовування захистів і автоматики — функції, яких не було в пристроях попередніх поколінь.

1.3 Види несправностей засобів релейного захисту та автоматики

Під несправністю зазвичай розуміють певну модель дефектів в об'єкті діагностування (ОД). Кожній несправності можна поставити у відповідність зміну структури зв'язків або параметрів елементів електричної схеми ОД. Наприклад, часто до допустимих несправностей відносять обриви, короткі замикання, вихід коефіцієнта підсилення підсилювача за межі встановленого допуску, або постійне підтримання логічного рівня «1» чи «0» на виході цифрової мікросхеми.

Модель несправності визначається як елементною базою об'єкта діагностування (ОД), так і конкретною моделлю самого ОД. Наприклад, для ОД, що включають резистори, конденсатори, діоди, транзистори та інші компоненти, до несправностей відносять обриви або короткі замикання резисторів і конденсаторів, пробої та закорочення напівпровідникових переходів, а також вихід параметрів елементів за межі допустимих значень. У деяких методах тестування мікропроцесорних пристроїв, заснованих на функціональній моделі ОД, несправність у механізмі вибірки регістра може проявлятися у передачі даних не до запланованого регістра, а до випадкового набору регістрів. Аналогічно, збої в механізмі адресації можуть призводити до втрати сигналів, їх затримок або формування неправильних команд керування [5, 7, 8].

Математична модель ОД може бути представлена як у явній, так і у неявній формі.

Явна модель об'єкта діагностування (ОД) складається з набору формалізованих описів як справного стану об'єкта, так і всіх (або кожної з розглянутих) його несправних варіантів. Для полегшення подальшої обробки бажано, щоб усі ці описи були представлені в єдиній формі.

Неявна модель ОД містить один формальний опис справного об'єкта, математичні моделі його фізичних несправностей, а також правила, за допомогою яких можна отримати всі інші варіанти описів. Зазвичай основою є модель справного стану, на базі якої будується представлення несправних модифікацій.

Загальні вимоги до моделей — як справного об'єкта, так і несправностей — полягають у достатній точності опису реальних систем та їх дефектів. У випадку неявних моделей додатковою умовою є зручність їх інтеграції з базовим описом об'єкта, що забезпечує простоту генерації інших необхідних описів.

Справний або несправний об'єкт можна розглядати як динамічну систему, стан якої в будь-який момент часу t характеризується набором вхідних, внутрішніх та вихідних параметрів. Особливий випадок — коли стан системи не змінюється з часом.

Об'єкти, у яких усі сигнали можуть приймати значення з безперервних множин, відносять до класу аналогових (неперервних) систем. Об'єкти, у яких значення сигналів приймають дискретні (скінченні) значення, а час розглядається як дискретна величина, належать до класу дискретних систем. Якщо частина контрольованих параметрів задається на безперервних множинах, а інша — на скінченних, то такий об'єкт вважається аналогово-цифровим або гібридним.

Системи, у яких вихідні сигнали визначаються виключно вхідними сигналами, називають комбінаційними або об'єктами без пам'яті. Послідовними або об'єктами з пам'яттю є ті системи, вихід яких залежить не лише від вхідних сигналів, а й від часу.

У діагностиці прийнято розрізняти одиночні та кратні несправності. Одиночна несправність вважається базовою — такою, що не може бути подана у вигляді сукупності дрібніших дефектів. Кратна несправність — це одночасне існування двох або більше одиночних несправностей.

Несправності поділяються на стійкі та нестійкі. До нестійких належать, зокрема, збій і переміжна відмова. При виборі моделі несправності важливо забезпечити чітку відповідність між моделлю та її фізичним змістом. На рисунку 1.3 наведена класифікація несправностей [5, 7].

Відмова (failure-free) — це подія, при якій працездатний стан об'єкта порушується.

Збій (error) — відмова, що може самоусунутися, або одноразова відмова, яку можна виправити незначним втручанням оператора.

Переміжна відмова — відмова, яка виникає багаторазово і самоусувається, маючи однаковий характер.

Раптова відмова — відмова, що супроводжується різкою, стрибкоподібною зміною одного або кількох параметрів об'єкта.

Поступова відмова — відмова, яка розвивається внаслідок поступового зсуву значень одного або декількох параметрів об'єкта.

Найпоширенішими несправностями є обриви з'єднань та утворення випадкових перемичок під час процесу паяння. Ці дефекти практично не залежать від характеристик окремих компонентів, проте порушують структуру (топологію) електричної схеми. Такі несправності необхідно виявляти та усувати вже на початкових етапах діагностики. Дефекти, що спричинені несправністю самих елементів, зустрічаються значно рідше, що зумовлено в першу чергу системою ретельного вхідного контролю комплектуючих виробів РЗА. Важливість такого контролю зростає через те, що сучасні друковані плати містять велику кількість компонентів. Із збільшенням числа елементів зростає ймовірність виходу з ладу принаймні одного з них, що може призвести до пошкодження плати. Наприклад, якщо при виробництві плати здійснюють вибірковий контроль транзисторів, який забезпечує надходження не більше 1% дефектних деталей, а кожен блок РЗА містить по 10 транзисторів, ймовірність наявності хоча б одного несправного транзистора на платі становить 0,1, отже приблизно 9 із 10 блоків будуть справними. Якщо ж плата має 100 компонентів, за тих самих умов шанс мати працюючий пристрій близький до нуля. Таким чином, чим більше компонентів у блоці, тим важливіше впроваджувати якісний вхідний контроль.

Зі зростанням складності об'єктів діагностування значно зростають і витрати на їх перевірку. Зокрема, статистичні дані свідчать, що виявлення несправності на рівні друкованої плати обходиться у 100 разів дешевше, ніж усунення її після введення в експлуатацію багатоплатного пристрою.

Найбільше досліджено питання формування набору можливих несправностей для об'єктів діагностування, реалізованих на цифрових інтегральних схемах [7,8,9].

Припустимо є цифровий елемент, який реалізує функцію $f(x_1,\ldots, x_m)$, де m – число входів елементу; $x_1,\ldots, x_m$ – вхідні змінні елементу, що приймають значення 0 чи 1. При i-й несправності елемент реалізує функцію $f_i(x_1,\ldots, x_m)$.

Будемо говорити, що несправності s_i і s_j елементу помітні, якщо $f_i(x_1,...,x_m) \neq f_j(x_1,...,x_m)$.

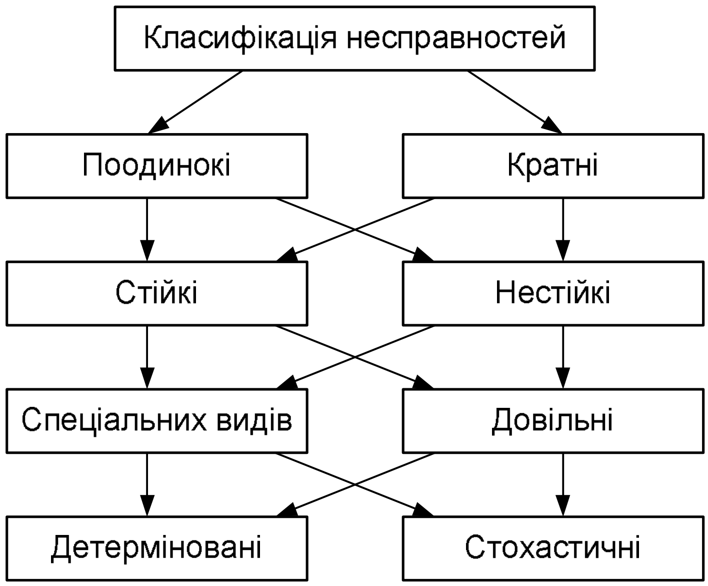


Рисунок 1.3— Класифікація несправностей

Число всіх можливих помітних функцій від m двійкових змінних дорівнює $2^{2^{m_i}}$. Відповідно, максимальна кількість можливих помітних несправностей для цифрового елемента з m входами не може бути більшою за $2^{2^{m_i}} - 1$, а загальне число одиночних несправностей схеми не може перевищувати

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

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

Проте на практиці кількість реальних помітних несправностей елемента значно менша за теоретично можливу максимальну кількість $2^{2^{m_i}} - 1$

1.4 Аналіз методів та засобів перевірки технічного стану релейного захисту та автоматики

До дискретних систем належать цифрові, імпульсні та певні релейні системи. На відміну від неперервних дискретних моделей (ДМ), модель дискретного об'єкта повинна враховувати не лише залежність вихідних величин від вхідних, а й положення окремих елементів системи. Ця особливість дискретних об'єктів накладає обмеження на вибір методів і інструментів для їх аналізу. Частково ці обмеження можна подолати за допомогою теорії кінцевих автоматів [5,7,9].

Щоб пояснити, що таке кінцевий автомат, розглянемо приклад роботи релейного пристрою. Релейний пристрій в момент часу t знаходиться в положенні $S(t)$, отримує сигнал $x(t)$, релейний пристрій видає на об'єкт, що захищає, сигнал управління $y(t)$ і переходить в інше положення $S(t+1)$. Це нове положення релейного пристрою ми вже відносимо до моменту часу $t+1$, оскільки відбулось переключення якогось реле.

Величини $x(t)$, $S(t)$, $y(t)$ безумовно мають векторний характер. Вхідний сигнал $x(t)$ позначає комбінацію сигналів $x_1, x_2 ... x_n$, що надходять по кожному входу в момент часу t, при цьому кожне x_i може бути нулем або одиницею; $y(t)$ – це комбінація вихідних сигналів $y_1(t)...y_m(t)$, що видаються пристроєм по всіх каналах в момент часу t, а $S(t)$ – комбінація положень окремих частин релейного пристрою: $S_1,...S_f$.

Значення $S(t+1)$ і $y(t)$ визначають законом, за яким функціонує пристрій. Цей закон можна відобразити двома функціями:

$$\left.\begin{aligned} S(t+1) &= \Phi_1\left[\mathrm{S}(t), x(t)\right]; \\ y(t) &= \Phi_2\left[S(t), x_1(t)\right]. \end{aligned}\right\} \tag{1.2}$$

Перше рівняння в системі (1.2) називають функцією переходу, а друге — функцією виходу. При наявності початкового стану пристрою ці функції дають змогу чітко описати його поведінку при будь-якій послідовності вхідних сигналів. Наприклад, знаючи $x(0), S(0)$ можна визначити $y(0)$ і $S(1)$; знаючи $S(1)$ і $x(1)$ — $y(1)$ і $S(2)$ і т. п.

Особливістю розглянутих функцій є те, що множини станів та вхідних сигналів мають кінцеву кількість значень, тому їх можна подати у вигляді таблиць.

Визначення множини вхідних та вихідних сигналів, станів релейного пристрою, а також його функцій переходів і виходів дає повне математичне описання релейного пристрою у вигляді так званого «кінцевого автомата з пам'яттю».

Для кращого розуміння розглянемо приклади побудови кінцевого автомата на прикладі електромеханічного реле (рисунок 1.4).

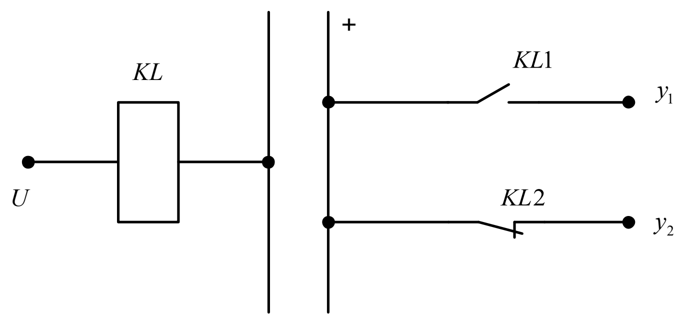


Рисунок 1.4 — Заступна схема релейного пристрою

В даному випадку U — це вхідний сигнал $U = \{0,1\}$; $S = 0$ — якір реле KL відпущено; $S = 1$ — якір реле KL підтягнуто; $y_1 = KL1$ — перший вихід реле, $KL1 = \{0.1\}$; $y_2 = KL2$ — другий вихід реле, $KL2 = \{1.0\}$.

Задамо функцію переходів у вигляді $S(t+1) = \Phi_1\{S(t), U(t)\}$, табл. 1.2, а виходів – у вигляді табл. 1.3

Таблиця 1.2— Таблиця функції переходів

S \ U	0	1
0	$\boxed{0}$	1
1	0	$\boxed{1}$

Таблиця 1.3— Таблиця функції виходів

y1

S \ U	0	1
0	0	1
1	1	1

y2

S \ U	0	1
0	1	0
1	0	0

$$y_1 = KL1 = \Phi'_2\left[S(t), U(t)\right]; \quad y_2 = KL2 = \Phi'_2\left[S(t), U(t)\right].$$

Функції переходів і виходів можна зручно поєднати в єдину таблицю (табл. 1.4), оскільки функції виходів залежать виключно від поточного стану реле.

Таблиця 1.4 — Сумісна таблиця

S \ U	0	1	$KL1(y_1)$	$KL2(y_2)$
0	[0]	1	0	1
1	0	[1]	1	0

Розглянемо принцип побудови функції переходів і виходів для реле часу (рис.1.5).

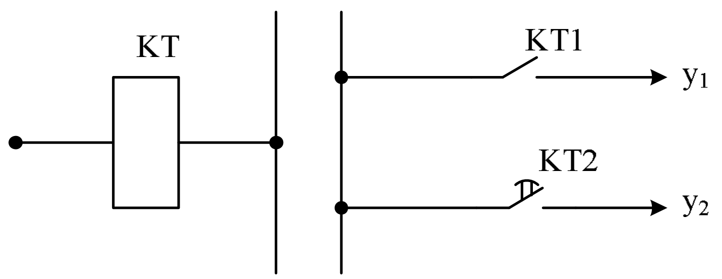


Рисунок 1.5— Заступна схема реле часу

Для опису реле в даному випадку вводиться більша кількість станів $S=0$, коли якір відпущено; $S=1$, коли якір реле підтягнуто і замкнено миттєвий контакт; $S=2$ – реле підтягнуто і замкнено всі контакти. Перехід із стану $S=1$ в $S=2$ визначається витримкою часу. Якщо реле має ще і контакт ковзання, то потрібно ще більше станів. Функцію переходів і виходів реле часу відображено у табл. 1.5

Таблиця 1.5 — Таблиця переходів і виходів реле часу

S \ U	0	1	KT1	KT2
0	[0]	1	0	0
1	0	2	1	0
2	0	[2]	1	1

Розглянемо складніший релейний пристрій (рис. 1.6). У ньому, окрім основних входів і виходів, виділимо також входи і виходи окремих реле. Завдяки цьому релейний пристрій можна поділити на дві складові. Першу складову, яка охоплює обмотки окремих реле, назвемо «пам’яттю». Входами «пам’яті» є входи відповідних реле, а виходами — їхні виходи. Друга складова являє собою схему, що об’єднує всі окремі реле в єдину систему; її входами служать як основні входи релейного пристрою, так і виходи «пам’яті», а виходами — основні виходи пристрою і входи «пам’яті». Цю частину прийнято називати комбінаційною.

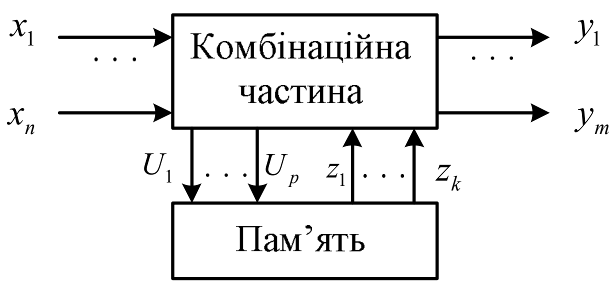


Рисунок 1.6 — Структура складного релейного пристрою

Виходячи з описаної структури, роботу релейного пристрою можна подати у вигляді системи рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} &S(t+1)=\varphi_1[S(t),U(t)];\\ &U(t)=\varphi_2[x(t),z(t)];\\ &y(t)=\varphi_3[x(t),z(t)];\\ &z(t)=\varphi_4[S(t)]. \end{aligned}\right\} \qquad (1.3)$$

Систему рівнянь (1.3) можна перетворити в систему рівнянь (1.2).

$$\left.\begin{aligned} &S(t+1)=\varphi_1[S(t),\varphi_2[x(t),z(t)]];\\ &y(t)=\varphi_3[x(t),\varphi_4[S(t)]]. \end{aligned}\right\} \qquad (1.4)$$

Систему рівнянь (1.3) також можна представити у вигляді таблиці, однак її розмір і складність зростатимуть значно. Наприклад, при наявності семи входів $U(t)=7$ і кількість реле $n_p=5$ на два положення, то кількість положень входів буде $2^7=128$, а положень пристроїв $2^5=32$. Таблиця переходів і виходів буде мати $32\times128=4096$ клітин. Таку таблицю складно не лише створити, але й проаналізувати через її великий розмір. Тому застосовують комбінований підхід: перше і четверте рівняння системи (1.3) представляють у вигляді таблиць. Ці таблиці складаються з таблиць переходів і виходів окремих реле, які досить прості та вже були побудовані раніше.

$$\begin{aligned} &U_1(t)=\phi_2^{(1)}\left[x_1(t)...x_n(t);\, z_1(t)...z_k(t)\right],\\ &.\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\\ &U_p(t)=\phi_2^{(p)}\left[x_1(t)...x_n(t);\, z_1(t)...z_k(t)\right],\\ &y_1(t)=\phi_3^{(1)}\left[x_1(t)...x_n(t);\, z_1(t)...z_k(t)\right],\\ &y_m(t)=\phi_3^{(m)}\left[x_1(t)...x_n(t);\, z_1(t)...z_k(t)\right]. \end{aligned}$$

Друге і третє рівняння системи (2.8) задають у формі булевих рівнянь, що суттєво спрощує опис і аналіз комбінаційної частини. Дійсно, x, y, U, z є векторами, компоненти яких можуть приймати значення 0,1. Розпишемо ці рівняння для кожної із компонент.

Відомо, що функції, які мають дві величини [0, 1] і у яких аргументи також приймають два значення, можуть бути записані у вигляді формул булевої алгебри. Наприклад, для комбінованої частини релейного пристрою (рис. 2.18) складемо друге рівняння системи (1.3)

$$U_{KL} = \varphi_2^{KL}\left[x(t), z(t)\right] = \varphi_2^{KL}\left[a, b, \overline{c}, d, \overline{e}, f\right].$$

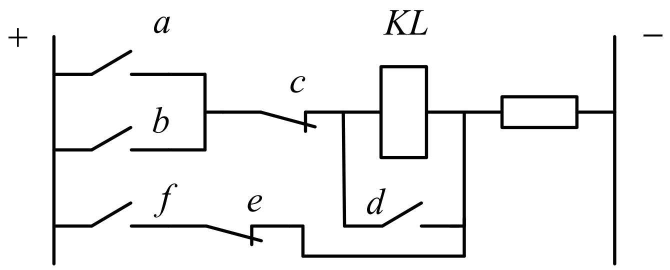


Рисунок 1.7 — Комбінована частина схеми релейного пристрою

Змінна $U_{KL}(t) = 1$ в тому і тільки в тому випадку, якщо в схемі існує хоча б одне замкнене коло з контактів, через яке струм може проходити від плюса джерела живлення до мінуса, і при цьому відсутні будь-які інші кола, які б шунтували (обходили) це коло

В загальному випадку може бути $R_1.....R_n$ кіл, які проходять через обмотку реле і $T_1.....T_m$ кіл, що шунтують обмотку реле, кожне із цих кіл може знаходитись в двох положеннях 1 — замкнений і 0 — розімкнений, тоді можна записати таке рівняння

$$U_{KL}(t) = (R_1 V R_2 ... V R_n) \Lambda \overline{(T_1 V T_2, ... V T_n)};$$

$$U_{KL}(t) = (1, V0...V0)\overline{(0, V0.....V0)} = 1 \cdot \overline{0} = 1 \cdot 1 = 1.$$

Для наведеної схеми

$$R_1 = a \cdot \overline{c};\ R_2 = b\overline{c};\ T_1 = f\,\overline{e};\ T_2 = d.$$

$$U_{KL}(t) = \left(a\overline{c}Vb\overline{c}\right) \times \left(\overline{f \cdot \overline{e}Vd}\right) = 1.$$

Об'єктом діагностування в системах релейного захисту та автоматики (РЗА) є вимірювальна та логічна складові, які можна реалізувати за допомогою міні-ЕОМ. Оскільки обладнання РЗА розташоване безпосередньо біля електроустаткування, можливе застосування двох способів перевірки: оперативного — прямо на обладнанні, та ремонтного — у спеціалізованих підрозділах.

Пошкодження в РЗА можуть мати різний характер, зокрема відмови в роботі, хибні спрацьовування, зміни чутливості тощо, тому для діагностики використовують часткові або повні перевірки. Часткова перевірка полягає у тестуванні захисту шляхом імітації основних робочих режимів об’єкта захисту (ОЗ) із застосуванням спеціалізованих приладів або програмних емуляторів. Цей метод вимагає відключення РЗА від ОЗ і дозволяє лише виявити наявність несправностей у вимірювальній чи логічній частинах, але потребує високої кваліфікації персоналу та значного часу на виконання.

Повна перевірка передбачає поелементний контроль як вимірювальної, так і логічної частини за допомогою спеціальних тестових процедур, що дає змогу ідентифікувати та замінити пошкоджені компоненти. Такі перевірки легше автоматизувати і вони потребують менше часу на підготовку.

Головною складовою імітаторів є осцилограми струмів і напруг, що відображають різні режими роботи об’єкта захисту: нормальний, коротке замикання, перевантаження, асинхронний режим та інші. Ці осцилограми зберігають на магнітній стрічці. Процедура перевірки полягає у зчитуванні цих характеристик із стрічки та перетворенні їх у вхідні сигнали для пристроїв РЗА, які перед цим відключають від об’єкта захисту. Якщо релейний захист працює справно, то на нормальні сигнали він не реагує, а при наявності відхилень від нормального режиму спрацьовує, що підтверджує його коректну роботу.

Що стосується діагностичних описів, то існують два основні підходи до їх створення, які можуть бути реалізовані як вручну, так і за допомогою електронно-обчислювальної машини.

Послідовність операцій першого методу:

1 Виконується логічне представлення схеми S;

- Формується перелік F несправностей для кожного елемента схеми S, кожна несправність позначається як fi; результати фіксуються у таблиці функцій несправностей. Цю процедуру повторюють для всіх можливих несправностей і всіх варіантів вхідних сигналів;

- Здійснюється моделювання (ручне або автоматизоване) схеми S з урахуванням несправності fi; отримані дані заносять у таблицю функцій несправностей. Цей крок повторюється для кожної несправності та кожного набору вхідних сигналів;

- Проводиться аналіз отриманої таблиці, підготовлюється форма $\sum \pi$ — диз'юнкція індексів тих наборів вхідних сигналів, на яких поведінка схеми з несправністю fi відрізняється від справної;

- Переходять до форми , де складають кон'юнкцію всіх диз'юнкцій, отриманих на попередньому кроці, і виконують відповідні алгебраїчні перетворення;

- Із сформованих диз'юнкцій обирають один вираз, який надалі використовується як тест.

Послідовність операцій другого методу:

- Описують досліджувану схему S за допомогою існуючої моделі, що включає її елементи та зв'язки між ними;

- Для кожного і-го елемента вводять несправність fi та перевіряють, чи впливає вона на сигнал елемента або чи передається спотворення на вихід схеми, який доступний для спостереження;

- Паралельно і поетапно визначають вхідні комбінації сигналів, які створюють умови для передачі ефекту і-го пошкодження до виходу схеми.

Відповідно до загальноприйнятих принципів, локальна автоматизована система РЗА має двоступеневу структуру: на першому рівні розташовані зовнішні засоби автоматизації перевірок, що базуються на сучасній мікропроцесорній техніці, а другий рівень включає централізовану систему збору й аналізу діагностичних даних, оснащену пакетом програмного забезпечення та базою даних для уніфікації методик перевірки РЗА.

Для автоматизації процесу створення тестів логічної складової використовується програмний комплекс «АИСТ». У пакетах, що відповідають за аналогову частину, присутні стандартизовані програмні інструменти для моделювання режимів роботи, а також для збору та обробки експериментальних характеристик основного технологічного обладнання.

Підвищення надійності досягається шляхом використання само перевірних тестів логічних частин, тобто застосовують паралельно два захисти. Сигнал на вимкнення об’єкта видається тільки тоді, коли спрацьовує одночасно два захисти (1,1), при сигналі (1,0) або (0,1) вважають, що один із захистів пошкоджений. Відповідальний захист може потроювались і сигнал на вимкнення видається за правилом. $S = S_1S_2 \vee S_2S_3 \vee S_1S_3$ де S_1, S_2, S_3 – сигнали відповідного захисту.

Для перевірки датчиків застосовують різні методи, зокрема мажорування, порівняння з еталонним датчиком та порівняння з встановленою граничною величиною.

Метод мажорування передбачає використання кількох додаткових датчиків для вимірювання одного параметра, а кінцеве значення параметра визначається за результатом більшості вимірювань цих датчиків. Наприклад, якщо вимірюється цифрова величина, то рішення приймаються за правилом $R = XY \vee XZ \vee YZ$. Мажорування можна виконати як за рахунок апаратурної реалізації, так і за рахунок запасу часу.

Метод порівняння з еталонним датчиком базується на зіставленні виміряного параметра з показниками еталонного датчика. На основі цієї порівняння приймається рішення щодо наявності пошкодження датчика. Для точності еталонний датчик розміщують поруч із основним, щоб їхні показники були максимально схожими.

Метод порівняння з попередньо встановленою межею полягає у виявленні значних відхилень у роботі датчиків. Цей підхід враховує випадки, коли датчик не подає сигнал або формує сигнал, що значно перевищує реальне значення. Спочатку обчислюють допустимі межі, які потім заносяться в пам'ять комп'ютера. Цей метод реалізується виключно програмним способом.

Для контролю аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) застосовують мажорування або дублювання, а також метод використання еталонного каналу. Ці підходи значно розширюють можливості перевірки не лише датчиків, а й виконавчих пристроїв, а також компонентів комп'ютера, що відповідають за обробку первинної інформації від АЦП і цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП).

Повна перевірка охоплює інформаційний канал, що складається з датчика, лінії зв'язку, узгоджувальних пристроїв та АЦП. При цьому ресурс на відмову датчика є невисоким, а час на виявлення несправності може сягати до 1,5 години.

Наприклад, сучасна структурна схема діагностування енергоблока може бути подана як [5]

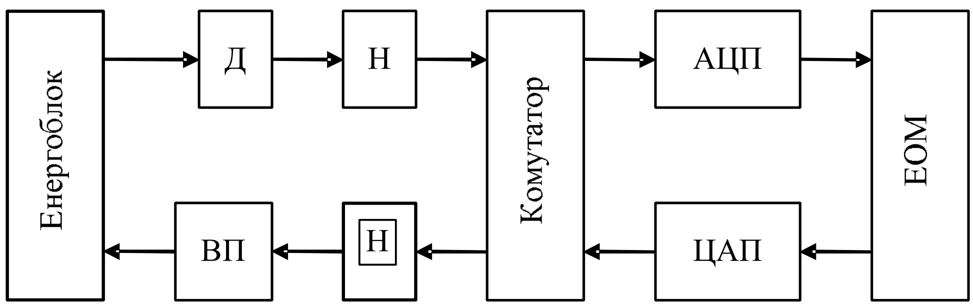


Рисунок 1.8— Структурна схема діагностування енергоблока

На рисунку 1.8 приведені такі позначення: Д — давач; Н — нормалізатор; АЦП, ЦАП — аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі; ВП — виконавчий пристрій

Перспективним напрямом у системах керування є застосування ієрархічних структур. На початковому рівні розміщуються місцеві діагностичні системи блока МСД, а на вищому рівні — центральна система діагностування. Кожен рівень виконує свої функції: перший відповідає за виявлення несправностей, другий — за їх точну локалізацію.

1.5 Висновок по розділу

Аналіз вивчених аспектів дозволяє визначити основні напрями дослідницької роботи, зокрема:

1. Визначення актуальності проблематики.
2. Загальний огляд засобів релейного захисту та автоматики.
3. Особливості конструкції мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики.
4. Класифікація типів несправностей у засобах релейного захисту та автоматики.
5. Оцінка методів і засобів контролю технічного стану релейного захисту та автоматики.
6. Розробка і вдосконалення методик визначення технічного стану РЗА.
7. Моделювання діагностичних систем для пристроїв релейного захисту та автоматики.
8. Синтез тестових наборів для діагностики релейного захисту та автоматики.
9. Оптимізація процедур діагностування засобів релейного захисту та автоматики.

2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

2.1 Побудоиа діагностичної моделі пристроїв релейного захисту та автоматики

Пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА) як об'єкти діагностики характеризуються наявністю вимірювальних і логічних блоків, включаючи елементи з витримкою часу. Вони мають суворі обмеження щодо вибору контрольних точок і діагностичних показників, а також ліміти на кількість тестових комбінацій вхідних сигналів. Крім того, для різних видів технічного обслуговування передбачені різні вимоги до глибини діагностики. Урахування цих специфічних рис РЗА потребує створення моделей різних типів. Процес розробки діагностичної моделі складається з двох основних кроків: спочатку формується функціональна модель, а потім — математична. [5,7,8].

Створення функціональної моделі передбачає аналіз робочих режимів РЗА, вивчення особливостей різних типів перевірок, виділення основних функціональних складових, а також визначення видів несправностей цих складових і їх взаємозв'язків, включно з можливими комбінаціями несправностей. Важливо також зібрати і систематизувати інформацію про ресурси, необхідні для виконання окремих операцій під час перевірок, а також матеріали щодо ймовірності виникнення окремих видів несправностей.

Під функціональним елементом розуміють частину пристрою, для якої складено функціональний опис у вигляді систем рівнянь, таблиць переходів і виходів чи структурних формул. Окрім цього, відомі функції зв'язку з іншими елементами РЗА або зовнішніми компонентами, а також перелік можливих несправностей.

Об'єднання таких функціональних елементів із їхніми зв'язками, як внутрішніми, так і зовнішніми, утворює функціональну модель пристрою.

Другий етап пов'язаний з розробкою методик для створення перевірочних тестів, тестів для виявлення несправностей, а також оптимальних програм діагностики.

Розглянемо процес побудови функціональних моделей електромеханічних пристроїв РЗА. Будь-який пристрій у складі РЗА можна уявити як систему, яка взаємодіє із зовнішнім середовищем через вхідні та вихідні сигнали. Вхідними сигналами є виходи датчиків струму і напруги, тоді як вихідні сигнали відображають реакцію захисної системи на зовнішні впливи. Під виходами розуміють ланцюги, що передають команди на виконавчі механізми.

Розглянемо два варіанти перевірки:

- Тестування РЗА за допомогою імітації основних режимів роботи об'єкта, що підлягає захисту. Така перевірка охоплює як вимірювальну, так і логічну складові релейного захисту.

- Окрема перевірка вимірювальних приладів та логічної частини пристрою. У цьому випадку на вхід пристрою подаються певні комбінації вхідних сигналів, після чого аналізують вихідні сигнали вимірювальної системи. Після підтвердження справності вимірювальних елементів здійснюють тестування логічної частини релейного захисту. Як вхідні сигнали для логічної частини розглядають ланцюги, що з'єднують її з вимірювальними органами. Якщо під час перевірки виявляються збої в роботі релейного захисту, то причиною є несправність логічної частини. Логічна частина може бути протестована незалежно від вимірювальної, якщо діагностичні сигнали формуються спеціальним пристроєм і подаються безпосередньо на її вхід.

Розглянемо модель, що застосовується для блочного виконання захисту. У цій моделі під контролем знаходяться лише зовнішні входи та виходи. Загалом пристрій розглядається як набір функціональних елементів, кожен із яких має один вихід, а для кожного елемента можна виділити два види несправностей. Хибні спрацювання назвемо несправністю першого типу і позначимо $(0 \to 1)$, де 0 позначає відсутність аварійної ситуації на об'єкті, що знаходиться, а 1 – наявність команди на виході елемента. Якщо РЗА при к.з. в елементі не спрацьовує, то будемо мати несправність другого типу $(1 \to 0)$, де 1 – позначає аварійну ситуацію; 0 – відсутність команди на виході елемента. Не вводимо обмежень на кількість одночасних фізичних пошкоджень елементів. У такому випадку роботу справного пристрою РЗА описує булева функція.

$$F_0\left(x_0,\ldots x_b\ldots x_{m-1}\right)=\left\{F_0^0,\ldots F_0^c,\ldots F_0^{n-1}\right\} \quad , \tag{2.1}$$

де F_0^c - функція, яка описує роботу справного функціонального елемента з виходом z_0.

Захист вважається справним, якщо існує відповідність, яка задається функцією виду F_0^c між станами виходів $z_0,\ldots z_c,\ldots z_{n-1}; z_c \in \{0,1\}$ і кожною діагностичною дією, $H_0,\ldots H_{2m-1}$ множини діагностичних дій

$$X=\left\{H_0,H_1,\ldots H_i,\ldots H_{2m-1}\right\} \text{ довжиною m, де } H_i=\left\{X_0^i\ldots x_b^i\ldots x_{m-1}^i\right\} \tag{2.2}$$

для функціонального елемента з виходом z_c складається із двох підмножин X_0^c, X_1^c, при цьому X_0^c - підмножина діагностичних дій, при яких функція F_0^c приймає значення 0, а X_1^c - підмножина при якій функція F_0^c приймає значення 1. Порушення відповідності, яке задається функцією $F_0\left(x_0,\ldots x_b,\ldots x_{m-1}\right)$ засвідчує наявність в захисті несправності. При подачі діагностичної дії із множини X_0^c і стану виходу $z_c=1$ спостерігається несправність типу (0-1). В цьому випадку робота РЗА описується функцією

$$F_{(0\to1)}^c\left(x_0,\ldots x_b,\ldots x_{m-1}\right) \; . \tag{2.3}$$

В разі подачі діагностичної дії із підмножини X_1^c і стану виходу $z_c=0$ несправність буде типу $(1 \to 0)$. Робота РЗА при цьому описується функцією

$$F_{(1\to 0)}^{c}\left(x_0,\ldots x_b,\ldots x_{m-1}\right) . \qquad (2.4)$$

Функція $F_0^c\left(x_0,\ldots x_b,\ldots x_{n-1}\right)$, яка описує роботу справної РЗА подається у вигляді таблиці станів (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Стан справного пристрою РЗА

Вхідні дії		x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	…	z_0	…	z_c	…	z_{n-1}
X_0^C	x_0	x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	…	R_{00}	…	0	…	$R_{(n-1)0}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_i	x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	…	R_{0i}	…	0	…	$R_{(n-1)i}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_h	x_{0h}	…	x_{bh}	…	$x_{(m-1)h}$	…	R_{0h}	…	0	…	$R_{(n-1)h}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
X_1^C	x_p	x_{0p}	…	x_{bp}	…	$x_{(m-1)p}$	…	R_{0p}	…	1	…	$R_{(n-1)p}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_g	x_{0g}	…	x_{bg}	…	$x_{(m-1)g}$	…	R_{0g}	…	1	…	$R_{(n-1)g}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_u	x_{0u}	…	x_{bu}	…	$x_{(m-1)u}$	…	R_{0u}	…	1	…	$R_{(n-1)u}$

В таблиці 2.1 0,…i,…h – це відповідні номери діагностичних дій, при яких $z_c = 0$; p,…g,…u – номери діагностичних дій, при яких $z_c = 1$; $R_{00},\ldots R_{0u},\ldots R_{(n-1)u}$ - реакція РЗА на подачу діагностичних дій відповідно $H_0,\ldots H_u$, що фіксуються на виходах $z_0, z_{n-1}; R_c \in \{0,1\}$.

Перебір всіх 2^m наборів вхідних змінних не потребується, так як перевірки імітують реальні умови роботи РЗА, а число можливих режимів роботи об’єкта, що захищається значно менше числа 2^m.

На основі таблиці станів можливо сформувати таблицю функцій несправностей для РЗА. Приписавши виходу z_c пристрою РЗА величину 0 при діагностичній дії із X_1^c і значення 1 при діагностичних діях із X_0^c , опишемо всі можливі варіанти несправностей обох типів у РЗА, які проявляються на виходах пристроїв. Для зручності, а також з метою отримання мінімального тесту і створення структури індикатора відмов РЗА, таблиця функцій несправностей представлена у вигляді двох окремих таблиць.: таблицею несправностей типу $(0 \rightarrow 1)$ (таблиця 2.2) і таблиці несправностей типу $(1 \rightarrow 0)$ (таблиця 2.3).

Таблиця 2.2 – Стан пристрою РЗА при несправностях типу $(0 \rightarrow 1)$

	Вхідні дані	x_0	…	x_{m-1}	z_c
	H_0	x_{00}	…	$x_{(m-1)0}$	1
	…	…	…	…	…
X_0^C	H_i	x_{0i}	…	$x_{(m-1)i}$	1
	…	…	…	…	…
	H_h	x_h	…	$x_{(m-1)h}$	1

Таблиця 2.3 – Стан пристроїв РЗА при несправності типу $(1 \rightarrow 0)$

	Вхідні дані	x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	z_c
	H_p	x_{0p}	…	x_{bp}	…	$x_{(m-1)p}$	0
	…	…	…	…	…	…	…
X_1^C	H_g	x_{0g}	…	x_{bg}	…	$x_{(m-1)g}$	0
	…	…	…	…	…	…	…
	H_u	x_{0u}	…	x_{bu}	…	$x_{(m-1)u}$	0

2.2 Особливості побудови діагностичної моделі багатоступінчастого захисту

Перевірка пристроїв РЗА, які включають кілька елементів витримки часу і мають один зовнішній вихід, проводиться з використанням їх функціональної моделі, наведеної на рисунку 2.3. Вимірювальний та логічний блоки (рис. 2.3) забезпечують роботу багатоступеневого захисту з витримкою часу відповідно ступенів I, II, ..., L. Функціональний елемент із номером L+1 об'єднує вихідні релейні елементи захисту, спільні для всіх L каналів. Оператори DIT, DIIT, ..., DLT реалізують витримку часу спрацювання захисту з часовими параметрами tI, tII, ..., tL відповідно. Кожен функціональний елемент може мати два типи несправностей: (0-1) та (1-0). У багатоступеневому захисті можливе виникнення множинних несправностей, тобто одночасна поява дефектів у групі функціональних елементів, оскільки один і той же фізичний елемент РЗА може входити до кількох функціональних елементів моделі.

Кожній несправності відповідає своя визначена функція $F_e^{\kappa}(x_o,\ldots x_b,\ldots x_{m-1})$, яка реалізується РЗА, де e - тип несправності, к - номер функціонального елемента, у якому сталася несправність.

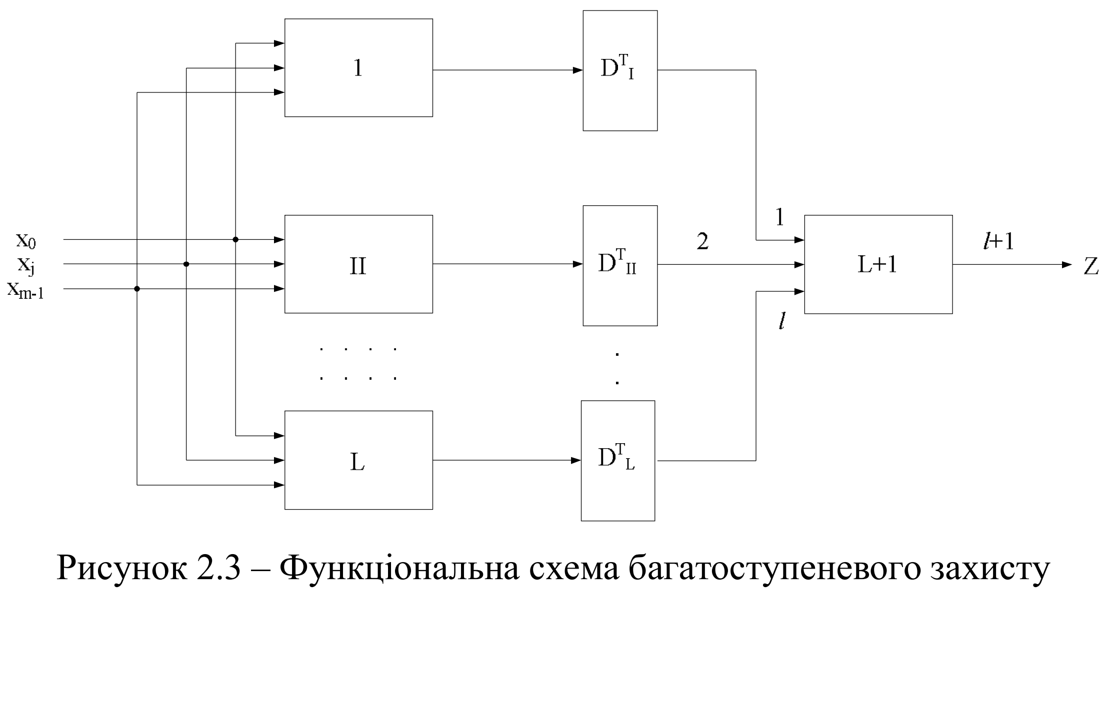


Рисунок 2.3 – Функціональна схема багатоступеневого захисту

Робота справної РЗА як і в попередньому випадку описується булевою функцією $F_0(x_0, x_b, ...x_{m-1})$. Вважається, що доступними для діагностування є виходи всіх функціональних елементів, тобто задано $l+1$ контрольних точок для яких справний пристрій реалізує функції $f_0(1),..., f_0(l+1)$, а несправний - функції $f_e^{\hat{e}}(1),\ldots f_e^{\hat{e}}(l+1)$.

Отже, функціональна модель пристрою РЗА вважається повністю визначеною. Побудова математичної моделі враховує, що фіксація реакції, яка сигналізує про несправність типу (1-0) в блоці k (де k = I, II, ..., (L+1)), відбувається з урахуванням витримки часу tk.

Стрічки таблиці 2.4 відповідають вхідним набором із множини $X=\{H_0, ...H_i, ...H_n, ...H_{m-1}\}$ – стовбці функціям із множини $F=\{f_0(1), ...f_0(L+1), ...f_2^{L+1}(1), ...f_2^{L+1}(1+1)\}$, що реалізується захистом в контрольних точках (1,2,..L+1).

Заповнюється таблиця 2.4 наступним чином: на перетину H_i-ї стрічки і $f_e^k(\mu)$-го стовбця записується реакція $R_i^{ek}(\mu)\in\{0,1\}$ захисту в μ – й контрольні точці на подачу і - ої діагностичної дії при наявності в k -ім функціональнім елементі *e* -ї несправності $\mu=1, 2, \ldots, l+1$; $i = 0, 1 \ldots 2^{m-1}$; типу e = (0-1), (1-0).

У розглянутих функціональних моделях перелік несправностей включає також логічні збої, які зазвичай не співпадають із фізичними несправностями, а їх пошук обмежується групою фізичних елементів. Такі моделі здебільшого використовують для оцінки працездатності РЗА з метою визначення необхідності виконання ремонтних або відновлювальних заходів.

Зменшення обмежень на вибір контрольних точок у структурі діагностованого РЗА дозволяє розширити застосування моделі за рахунок включення множини довільно обраних точок контролю. Щоб підкреслити значущість внутрішніх контрольних точок, їх виділяють у окрему підмножину джерел інформації. Використання такої додаткової інформації дозволяє виявляти несправності в статичному режимі роботи РЗА, тобто до того, як вони проявляться у вигляді відмов або помилкових спрацьовувань.

Таблиці 2.4 – Функції несправностей багатоступеневого захисту

Вхідна дія	x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	F_0				
						$f_{0(1)}$	…	$f_{0(2)}$	…	$f_{0(l+1)}$
H_0	x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	$R_{0(1)}$	…	$R_{0(2)}$	…	$R_{0(l+1)}$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
H_i	x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	$R_{i(1)}$	…	$R_{i(2)}$	…	$R_{i(l+1)}$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
$H_{2^{m-1}}$	$x_{02^{m-1}}$	…	$x_{b2^{m-1}}$	…	$x_{(m-1)2^{m-1}}$	$R_{2^{m-1}(1)}$	…	$R_{2^{m-1}(2)}$	…	$R_{2^{m-1}(l+1)}$
Вхідна дія	F_e^k					$F_2^{L+1)}$				
	$f_e^{к}{}_{(1)}$	…	$f_e^{к}{}_{(2)}$	…	$f_e^{к}{}_{(l+1)}$	$f_{2(1}^{((L+1)}$	…	$f_{2()}^{L+1}$	…	$f_2^{(L+1)}{}_{(l+1)}$
H_0	$R_0^{ек}{}_{(1)}$	…	$R_0^{ек}{}_{(2)}$	…	$R_0^{ек}{}_{(L+1)}$	$R_0^{2(lL+1)}{}_{(1)}$	…	$R_0^{2(L+1)}{}_{(2)}$	…	$R_0^{2(L+1)}{}_{(l+1)}$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
H_i	$R_i^{ек}{}_{(1)}$	…	$R_i^{ек}{}_{(2)}$	…	$R_i^{ек}{}_{(l+1)}$	$R_i^{2(L+1)}{}_{(1)}$	…	$R_i^{2(L+1)}{}_{(2)}$	…	Ri
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
$H_{2^{m-1}}$	$R^{eê}{}_{(2^{m-1})(1)}$	…	$R^{eê}{}_{(2^{m-1})(2)}$	…	$R^{eê}{}_{(2^{m-1})(l+1)}$	$R^{l+1}{}_{(2^{m-1})(1)}$	…	$R^{l+1}{}_{(2^{m-1})(2)}$	…	$R^{l+1}{}_{(2^{m-1})(l+1)}$

Нехай задано *e* внутрішніх контрольних точок. Позначимо сигнал у μ-тій контрольній точці як dμ, де μ = 1, 2, …, e, і dμ може приймати значення з множини {0, 1}. Ця умова також застосовна у випадку аналогового сигналу: у цьому разі вводять поріг, при перевищенні якого dμ вважається рівним 1, а якщо поріг не досягається — 0.

Справний пристрій РЗА, залежно від режиму роботи об'єкта, на якому він встановлений, може перебувати у одному з 2^m - 1 станів. Це означає, що можна виділити певну підмножину станів контрольних точок...

Справний пристрій релейного захисту та автоматики (РЗА), залежно від робочого режиму об’єкта, на якому він встановлений, може перебувати у різних 2^m-1 станах, тобто можна виділити підмножину станів контрольних точок

$$A' = \left\{ d_0, d_1, ..., d_i, d_{2^m-1}, \right\} , \qquad (2.5)$$

де

$$d_i = d_1^{\ i}, d_2^{\ i}, ..., d_\mu^{\ i}, d_e^{\ i}; i = 0,1,...,2^m - 1; d_\mu^{\ i} \in \left\{0,1\right\}.$$

Стан внутрішніх елементів РЗА зазвичай описується через значення сигналів у контрольних точках. Для справного пристрою існує чітка відповідність між станами його входів (X), виходів (Z) та контрольних точок (A'), яку можна представити, наприклад, у вигляді таблиці станів. При виникненні несправностей у елементах ця відповідність порушується, змінюється стан контрольних точок, і формується нова множина станів A".

В залежності від того, чи перетинаються множини A' і A", виділяють два основні варіанти порушення відповідності:

1) Несправність будь-якого елемента РЗА, незалежно від стану входів і внутрішніх елементів, призводить до зміни стану контрольних точок. d_g, де g = p, p+1,…u, і $d_g \in$ A", і підмножина станів в контрольних точках A' і A" не перетинаються і разом утворюють повну множину станів контрольних точок A' $\vee$ A" = A;

2) Несправності деяких елементів РЗА призводять до переходу зі стану d_i у стан d_j за умови незмінності стану входів X_j, і виходів $\xi_i(d_i, d_i \in A')$.

У першому випадку алгоритм формування математичної моделі РЗА полягає в записі станів контрольних точок у таблицю станів (див. табл. 2.5), де множина A' відповідає робочому стану, а множина A" — забороненому. Якщо кількість контрольних точок велика і відобразити всі можливі стани у таблиці є надзвичайно складно, то до таблиці заносять лише ті стани, що належать до меншої підмножини — або A', або A", залежно від того, яка з них містить менше елементів.

У другому випадку порядок дій змінюється, оскільки через різні несправності однаковий стан входів і виходів пристрою РЗА може відповідати різним станам контрольних точок $(d_i, d_i \in A')$, для визначення справного стану РЗА до таблиці 1.9 потрібно додати відповідні стани його входів і виходів. Через складність визначення несправних станів у таблицю дозволяється вносити лише стани, що належать до множини A' (робочі стани), як показано в таблиці 2.6.

Таблиця 2.5 – Стан контрольних точок пристрою РЗА

A		(1)	(2)	…	(μ)	…	(l)
A’	d_0	$d_0(1)$	$d_0(2)$	…	$d_0(\mu)$		$d_0(l)$
	…	…	…	…	…	…	…
	d_i	$d_i(1)$	$d_i(2)$	…	$d_i(\mu)$	…	$d_i(l)$
	…	…	…	…	…	…	…
	d_h	$d_h(1)$	$d_h(2)$	…	$d_h(\mu)$	…	$d_h(l)$
A”	d_p	$d_p(1)$	$d_p(2)$	…	$d_p(\mu)$	…	$d_p(l)$
	…	…	…	…	…	…	…
	d_g	$d_g(1)$	$d_g(2)$	…	$d_g(\mu)$	…	$d_g(l)$
	…	…	…	…	…	…	…
	d_u	$d_u(1)$	$d_u(2)$	…	$d_u(\mu)$	…	$d_u(l)$

Таблиця 2.6 – Стани контрольних точок, входів і виходів пристроїв РЗА.

d					x					ξ				
A'XZ	(1)	…	(μ)	…	x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	z_0	..	z_k	..	z_{n-1}
	$d_0(1)$	…	$d_0(\mu)$	…	x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	R_{00}	..	R_{C0}	..	$R_{(n-1)0}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	..	…	..	…
	$d_i(1)$	…	$d_i(\mu)$	…	x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	R_{0i}	..	R_{Ci}	..	$R_{(n-1)i}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	..	…	..	…
	$d_h(1)$	…	$d_h(\mu)$	…	x_{0h}	…	x_{bh}	…	$x_{(m-1)h}$	R_{0h}	..	R_{Ch}	..	$R_{(n-1)h}$

Для засобів РЗА, які містять елементи витримки часу, створено функціональну модель, у якій пристрій розглядається як сукупність функціонально пов’язаних фізичних елементів. Будь-яка несправність цих елементів призводить до зміни тривалості інтервалу від моменту подачі діагностичного сигналу до моменту зміни стану виходу пристрою РЗА на протилежний.

Перелік несправностей у цій моделі, окрім типових для «обриву» і «короткого замикання», включає також несправності елементів часу:

а) недопустиме зменшення витримки часу;

б) недопустиме збільшення витримки часу;

Реакція пристроїв РЗА фіксується виключно на їхніх виходах, що суттєво зменшує час, необхідний для підготовки та проведення діагностики, а також знижує ризик помилок персоналу під час перевірок.

Для створення моделі, яка враховує несправності елементів витримки часу, пристрій РЗА можна подати у вигляді кінцевого автомата. Для цього задаються множини вхідних (X), вихідних (Z) та внутрішніх (Y) станів, які утворюють відповідні алфавіти.

Дія автомата описується статикою канонічних рівнянь:

$$Z_0(t) = f[x_0(t), x_1(t), ..., x_{m-1}(t), Y(t)]; \tag{2.6}$$

. . . .

$$Z_{n-1}(t) = f[x_0(t), x_1(t), ..., x_{m-1}(t), Y(t)]; \tag{2.7}$$

$$Y(t) = \psi \cdot [x_0(t), x_1(t), ..., x_{m-1}(t), Y(t-1)]; \tag{2.8}$$

в яких функції $x_j(t)$, $z_j(t)$, y(t) приймають значення відповідно із алфавітів X, Z, Y.

Пристрій РЗА функціонує у вигляді послідовності дискретних тактів t = 1, 2, ..., 3, при цьому кожному такту відповідає певний стан внутрішньої пам'яті, який описується значеннями функції Y(t). Якщо в даному такті при стані Y(t) сприймаються по входам значення x_0, x_1, …x_{m-1}, то в цьому ж такті по вихідним каналам видаються букви $Z_j = f_j$ (x_0, x_1, …x_{m-1}, Y(1)) і створюється стан $Y = \psi$ (x_0, x_1, …x_{m-1}, Y(t)).

В заданому вигляді релейний пристрій можна описати рівняннями:\

$$Y(t) = f_1[Y(t-1), X(t)]; \quad (2.9)$$

$$Z(t) = f_2[Y(t), X(t)]. \quad (2.10)$$

Перший вираз (2.9) свідчить, що внутрішній стан автомата в момент часу t визначається поточним станом його входів і станом внутрішньої пам'яті у попередній момент. Друге рівняння вказує, що вихідний стан автомата в момент t залежить виключно від його внутрішнього стану в цей же час.

Це описує модель асинхронного кінцевого автомата Мура, де, окрім логічних змінних, час виступає як аргумент, представлених неперервною числовою віссю (часовою віссю). У цій моделі в проміжку від t до t+1 вхідні сигнали залишаються незмінними, а перехід між станами відбувається за рахунок зміни внутрішнього стану. При цьому часовий інтервал від t до t+1 поділяють на кілька нестійких тактів.

$$[t-(t+1)] = \tau_1 + \tau_2 + \ldots \tau_i + \ldots \tau_k, \quad i=1,2,\ldots k. \quad (2.11)$$

Інтервал нестійких тактів τ може відрізнятися і залежить від характеристик конкретного РЗА. Коли елементи виходять з ладу, їхні властивості змінюються, що призводить до зміни тривалості інтервалу часу [t – (t +1)].

Для кодування реакцій діагностованого РЗА та побудови таблиці функцій несправностей часова шкала РЗА поділяється на j послідовних проміжків від 0 до tmax, де tmax – це час витримки РЗА. Розмір кожного інтервалу обирають з урахуванням особливостей роботи конкретного алгоритму РЗА. Наприклад, для триступеневого дистанційного захисту доцільно розбити часову шкалу на вісім інтервалів, тобто j = 8:

$$\left.\begin{aligned} &t_1 = t^I - \Delta t^I, t_2 = t^I + \Delta t^I, t_3 = t^{II} - \Delta t^{II};\\ &t_4 = t^{II} + \Delta t^{II}, t_5 = t^{III} - \Delta t^{III}, t_6 = t^{III} + \Delta t^{III};\\ &t_7 = t_{\max} - t_6, t_8 > t_{\max}, \end{aligned}\right\} \tag{2.12}$$

де t', t'', t''' – витримки часу відповідно на першій, другій і третій ступенях $\Delta t'$, $\Delta t''$, $\Delta t'''$ – алгебраїчна сума затримок часу проходження сигналу в ланцюзі вимкнення захищуваного об’єкта при короткому замиканні у першій, другій та третій зонах відповідно.

Реакція захисту R_i^e при спрацюванні її в інтервалах часу $(t_{\beta-1} - t_\beta)$, де β=1,2,...γ, кодується , тобто $R_i^e \in (1,2,...\beta,...\gamma)$, а e = 0,1,2,·· |S| тип несправності і будується таблиця функцій несправностей пристрою РЗА.

Таблиця 2.7 – Функції несправностей пристроїв РЗА у вигляді часової моделі

Тестові вхідні дії	Стани РЗА, що діагностуються					
	F_0	F_1	F_k	...	F_e	$F_{\|S\|}$
H_0	R_0^0	R_0^1	R_0^k	...	R_0^e	$R_0^{\|S\|}$
H_1	R_1^0	R_1^1	R_1^k	...	R_1^e	$R_1^{\|S\|}$
...	...	...	...	...	...	...
H_i	R_i^0	R_i^1	R_i^k	...	R_i^e	$R_i^{\|S\|}$
...	...	...	...	...	...	...
H_{2^m-1}	$R^0{}_{2^m-1}$	$R^1{}_{2^m-1}$	$R^k{}_{2^m-1}$	···	$R^e{}_{2^m-1}$	$R^{\|S\|}{}_{2^m-1}$

Виконавши подібну побудову для кожного з n виходів пристрою РЗА, отримаємо 2n таблиць несправностей. Разом із таблицею 2.1 вони забезпечують повний опис роботи як справного, так і несправного пристрою РЗА за умови появи несправності, що призводить до зміни функціонального значення принаймні для однієї діагностичної дії. Розглянута модель підходить для аналізу як електромеханічних, так і безконтактних пристроїв РЗА. Основною метою при її створенні було забезпечення контролю працездатності РЗА, але у деяких випадках її можна використовувати і для пошуку несправностей з високою точністю, ідентифікуючи велику кількість компонентів РЗА через переключення певного вихідного ланцюга з індикацією типу несправності – (0-1) або (1-0).

Головною перевагою цієї моделі порівняно з іншими є простота проведення перевірки пристроїв у РЗА, а також мінімальні часові витрати та невелика потреба у контрольному обладнанні.

2.3 Побудова структурної моделі мікроелектронних пристроїв

Для опису засобів РЗА, виконаних на безконтактній елементній базі, наприклад, інтегральних мікросхемах, застосовують структурні математичні моделі [10, 11, 12].

Структурна модель — це логічна мережа, яка визначається наборами входів, виходів, логічних елементів, базису та зв’язків між ними.

Логічна мережа відображає архітектуру моделюваної схеми, тоді як математична модель фокусується на логічних несправностях. Під логічними несправностями розуміють дефекти, що призводять до зміни логічних функцій окремих елементів або всієї схеми, зазвичай це несправності типу «константа», які характеризуються фіксованим рівнем (зазвичай нуль) ≡ 0, або ≡ 1, і відносяться до входів і виходів логічних елементів.

Наприклад, маємо логічний елемент, який реалізує функцію $f(x_1,...x_m)$. В разі e – ої несправності елемент реалізує функцію $f_e(x_1,...x_m)$. Будемо вважати, що несправність e і e' елемента можна розрізняти, якщо

$$f_e(x_1..., x_m) \neq f_{e'}(x_1..., x_m) \quad . \qquad (2.13)$$

Від логічної мережі переходять до аналітичного подання булевих функцій, що реалізуються цією мережею, формуючи таким чином структурно-аналітичні моделі пристроїв РЗА.

Структурно-аналітичною моделлю пристрою РЗА є представлення булевої функції у еквівалентній нормальній формі, яка отримується шляхом застосування операцій внутрішньої суперпозиції до системи вихідних функцій елементів мережі. При цьому індекси змінних відповідають номерам відповідних елементів.

Розглянемо ідею виділення суттєвих шляхів в структурі, яка використовується при синтезі тестів. Для цього розглянемо елемент логічної схеми E_i, який реалізує одну із функцій прийнятого базиса із входами

$$x_1,\dots x_i,\dots x_m;\ x \in \{0,1\},\ i = 1,2,\dots m.$$

Припустимо, що під час діагностування ми маємо можливість контролювати як вихід, так і всі входи конкретного елемента. При перевірці, наприклад, входу x_i доцільно підібрати таку комбінацію значень інших входів $x_i,\dots x_{i-1},\dots x_{i+1},\dots x_m$, щоб вихід z_j визначався значенням $\widetilde{x}_i$, тобто $z_j \equiv x$. Символ ~ (тильда) позначає, що змінна може приймати як одиничне, так і нульове значення.

Тоді будь-яка несправність на вході, що перевіряється, яка спричиняє зміну вихідного сигналу, буде відображена на виході елемента у вигляді інверсії коректного значення z_j. Але в загальному випадку виходи елементів, в тому числі z_j недоступні, тобто відділенні від фізичного виходу схеми елементами $E_{i+1}\dots E_k$. Задача полягає в підборі таких комбінацій вхідних сигналів, щоб активізувати одночасно входи x_i, z_j, z_{j+1} елементів так, щоб $z_j = \widetilde{x}_i;\ z_{j+1} = \widetilde{z}_j;\ z_k = \widetilde{z}_{k-1}$. Тоді спотворення сигналу, яке викликане несправністю, на будь-якій з ліній $x_i, z_j, z_{j+1}\dots z_k$ призведе до інверсії правильного значення виходу логічної схеми.

Перевірка суттєвого шляху передбачає тестування кожної його частини, тому прагнуть зробити цей шлях максимально довгим. Щоб повністю перевірити суттєвий шлях, потрібно пропустити через нього обидва можливі значення вхідного сигналу — 1 і 0. Для цього достатньо, щоб початкова вхідна змінна цього шляху приймала обидва ці значення.

Пошук тестових наборів для перевірки всіх зв'язків у діагностованій схемі, що забезпечує активацію усіх шляхів від входів до виходів, доцільно виконувати з використанням булевих похідних у рамках структурно-аналітичної моделі [7].

Булевою похідною функції $F(X) = F(x_1, x_2, ..., x_m)$ по змінній $x_i \in X$ називають вираз $dF(X)/dx_i = F(x_1, ...x_i, ...x_m) \wedge F(x_1, ...\overline{x_i}, ...x_m)$ або еквівалентний йому вираз

$$dF(X)/dx_i = F(x_1, ...x_{i-1}, 1, ...x_{i+1}, ...x_m) \wedge F(x_1, ...x_{i-1}, 0, ...x_{i+1}, ...x_m), \tag{2.14}$$

де $\wedge$ – знак операції додавання, по mod2.

Зміст булевої похідної поля гає в наступному. Якщо на вході схеми x_i, яка реалізує функцію F(x), виникає несправність, яка переводить x_i в $\overline{x_i}$, або навпаки $\overline{x_i}$ в x_i ,то при цьому $F(x_1, ...x_m)$ переходить в $F(x_1 ..., \widetilde{x}_i, ...x_m)$ і навпаки.

Таким чином, похідна *dF(x)/dx,* дозволяє визначити співпадають значення функцій $F(x_1 ..., x_i, ...x_m)$ і $F(x_1 ..., \overline{x_i}, ...x_m)$ тобто чи виявляється несправність входу x_i на виході схеми.

Друга булева похідна функції $F(x) = F(x_1 ..., x_i, ...x_j, x_m)$ по змінній x_i і x_j визначають за виразом

$$d^2F(X)/(dx_1 dx_j) = F(x_1, ...x_i, ..., x_j, ...x_m) \wedge F(x_1, ...\overline{x}_i, ..., \overline{x}_j, ...x_m), \tag{2.15}$$

який дає можливість судити чи проявляється несправності двох входів x_i і x_j схеми на її виході, аналогічно можна визначити похідні більш високого ступеня, які дозволяють провести аналіз несправностей любої кратності в схемі.

Булева функція *F(x)* не залежить від змінної x_i, якщо

$$F(x_1...,x_i,...x_m) = F(x_1...,\overline{x_i},...x_m) \tag{2.16}$$

і від змінних x_i і x_j, якщо

$$F(x_1...,x_i,...x_j,x_m) = F(x_1...,\overline{x}_i,...\overline{x}_j,x_m) \quad . \tag{2.17}$$

Булева похідна функції *F(x)* відносно n змінних $X_n\{x_1,x_2,...x_n\},(n \le m)$ $X_n \le X$ визначається за виразом

$$\frac{dF(x)}{dX_n} = \frac{d}{dX_1}\left(\frac{d}{dX_2}\left(...\frac{dF(x)}{dX_n}\right)...\right) \tag{2.18}$$

Якщо $dF(X)/dx_i = 0$, то несправність на вході x_i схеми не викликає спотворення сигналу на її виході *F(X),* а це означає, що *F(X)* не залежить від x_i. Якщо $dF(X)/dx_i = 1$, то несправність на вході x_i схеми буде викликати спотворення сигналу на її виході *F(x)*.

Висновок по розділу:

1. Дослідження підтвердили, що розробка діагностичної моделі проходить у два основні етапи: створення функціональної моделі та формування математичної моделі.

2. Створення функціональної моделі передбачає вивчення режимів роботи релейного захисту і автоматики (РЗА), аналіз особливостей процедур перевірки, виділення ключових функціональних складових, дослідження типів

можливих несправностей, а також збір і систематизацію експлуатаційних даних РЗА тощо.

3. При формуванні функціональної моделі РЗА розглядається як система з взаємодією із зовнішнім середовищем через її вхідні та вихідні сигнали. При цьому враховуються результати випробувань, що імітують основні робочі режими об’єкта захисту, а також перевірка вимірювальних пристроїв і логічних компонентів засобів контролю шляхом подачі певних комбінацій вхідних сигналів.

4. Помилкові спрацьовування слід трактувати як несправності першого виду (0-1), а невизначені несправності — як другого виду (1-0). На основі таблиці станів можна побудувати таблицю функціональних несправностей, яка повністю описує роботу РЗА як у справному, так і в несправному стані, незалежно від апаратної реалізації.

5. Розглянуто функціональну модель багаторівневого захисту, в якій можливе одночасне виникнення множинних несправностей у групах функціональних елементів. Роботу справного РЗА, подібно до попереднього випадку, можна подати у вигляді булевої функції. Припускається, що виходи функціональних елементів доступні (визначені контрольні точки), завдяки чому функціональна модель РЗА повністю описується. Якщо у РЗА присутні елементи з часовою витримкою, функціональна модель формується як набір взаємозв’язаних елементів.

6. Структурну модель РЗА доцільно уявляти як логічну мережу, що складається з входів, виходів, логічних елементів, базису та зв’язків між ними. Її будують у вигляді булевої функції у еквівалентній нормальній формі, отриманій шляхом застосування вихідних функцій елементів мережі та операцій внутрішньої суперпозиції. При цьому індексація елементів зберігається у вигляді номерів змінних. Аналіз несправностей здійснюється за допомогою булевих похідних.

3 СИНТЕЗ ТЕСТІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

3.1 Алгоритмічний підхід до створення тестів, які забезпечують виявлення логічних дефектів у складових релейного захисту та автоматики

Цей метод базується на концепції виділення ключових маршрутів у схемі шляхом формування тимчасових D-кубів. Логічний куб представляє собою вектор розмірності n, де кожен елемент має одне з п’яти можливих значень: $0, 1, x, D, \overline{D}$, тут символом *x* позначають будь-який стан, а значення D і $\overline{D}$ розглянемо більш детально.

Кожному логічному елементу схеми відповідають три типи множин кубів, які застосовуються при створенні тестів: вироджені куби, D-куби та тупикові D-куби.

Наприклад, для елемента І-НІ з трьома входами множина вироджених кубів виглядає так: (1,1,1,0), (0,x,x,1), (x,0,x,1), (x,x,0,1). Якщо виконати операцію перетину вироджених кубів A та B для i-го елемента за умови, що значення на виході в A і B відрізняються, отримаємо множину D-кубів цього елемента.

Якщо ж під час побудови послідовності D-кубів вимагати, щоб вихідні значення у A і B співпадали, проте принаймні в одній координаті виходу вони відрізнялися, тоді формується множина тупикових D-кубів. Перетин кубів виконується по координатах і описується згідно з [7, 13].

$$g_i = \begin{cases} a_i, & якщо \quad b_i = x, \quad або \quad a_i = b_i \\ b_i, & якщо \quad a_i = x; \\ D, & якщо \quad a_i = 1, \quad b_i = 0 \\ \overline{D}, & якщо \quad a_i = 0, \quad b_i = 1 \end{cases} \tag{3.1}$$

Якщо для принаймні однієї координати результат операції перетину не може бути визначений, то вважається, що перетин кубів А і В є невизначеним або порожнім.

Застосовуючи правило (3.1), для елемента І-НІ отримуємо наступний набір D-кубів:

$$(D,1,1,\overline{D});\quad (1,D,1,\overline{D});\quad (1,1,D,\overline{D});\quad (D,D,1,\overline{D});\quad (D,1,D,\overline{D});\quad (1,D,D,\overline{D});\quad (D,D,D,\overline{D});$$
$$(\overline{D},1,1,D);\quad (1,\overline{D},1,D);\quad (1,1,\overline{D},D);\quad (\overline{D},\overline{D},1,D);\quad (\overline{D},1,\overline{D},D);\quad (1,\overline{D},\overline{D},D);\quad (\overline{D},\overline{D},\overline{D},D),$$

а також множину тупикових D – кубів:

$$(D,\overline{D},x,1);\quad (\overline{D},D,x,1);\quad (D,x,D,1);\quad (\overline{D},x,D,1);\quad (x,D,\overline{D},1);\quad (x,\overline{D},D,1);$$

Використання D-кубів дає змогу створювати тести для виявлення постійних несправностей у комбінаційних схемах. Стан схеми після подачі тестового сигналу на її вхід описується логічним кубом $TF=(\ tfi....tf_n\ )$. Координата ***i*** куба TF відповідає і-й лінії схеми. Суть D-алгоритму полягає у забезпеченні поширення несправності від точки її виникнення до виходу схеми. Спочатку визначається значення лінії, на якій знаходиться несправність $\equiv 0$, ($\equiv 1$). після чого послідовно виконується операція перетину логічного куба TF із D-кубами елементів схеми. Цей процес завершується отриманням значення на одному із вхідних сигналів. Далі відбувається етап визначення відсутніх даних на вході, при якому формується несуперечливий набір вхідних сигналів, що відповідають умовам, встановленим під час D-проходу.

Логічну складову релейного захисту можна змоделювати у вигляді асинхронного кінцевого автомата Мура з урахуванням елементів витримки часу. Якщо відключити зворотні зв'язки, отримаємо комбінаційну схему, що імітує роботу асинхронного автомата протягом одного такту. Для пристроїв релейного захисту особливе значення мають елементи з витримкою часу. Оскільки в РЗА, побудованих на інтегральних мікросхемах, час поширення сигналу через елементи витримки значно перевищує затримки на інших складових, після подачі сигналу Ні схема переходить у проміжний стан, що формується виключно роботою елементів витримки часу.

Отже, коли D-шлях проходить через елемент із витримкою часу, координати тестового куба TF, що відповідають виходу цього елемента, набувають значення, які залежать від часу. Якщо і-й елемент витримки активується логічним нулем, то на його виході через проміжок часу t_i, що визначається характеристиками витримки цього елемента, з’явиться нульове значення сигналу. Позначимо значення вихідного сигналу як $O(t_i)$. Тому, при подачі на вхід і-го елемента витримки часу значення $\overline{D}$ на його виході буде значення $\overline{D}^t$. Запис $\overline{D}^t$ позначає, що в справній схемі нульове значення з'являється на лінії через час t після подачі діагностичної дії. У несправній схемі вихідний сигнал приймає значення одиниці. У таблиці 3.1 наведені стани елемента з витримкою часу залежно від вхідного сигналу та умов його активації.

Таблиця 3.1 – Поведінка елемента витримки часу при різних вхідних сигналах

Умови активності елемента	Вхідні сигнали	Вихідний сигнал		
		Загальне позначення	в схемі	
			справний	несправний
0	1	1	1	1
	0	0(t)	0(t)	0(t)
	D	D_t	1	0(t)
	$\overline{D}$	$\overline{D}_t$	0(t)	1
1	1	1(t)	1(t)	1(t)
	0	0	0	0
	D	D_t	1(t)	0
	$\overline{D}$	$\overline{D}_t$	0	1(t)

Отримані умови для проходження D-шляху через елементи з витримкою часу назвемо часовими D-кубами першого типу. Активний шлях, в результаті якого на виході схеми з'являються відповідні сигнали, позначатимемо як тимчасовий D-шлях. Такий шлях може виникати не лише при проходженні через елементи витримки часу, а й у випадку певних комбінацій сигналів на лініях схеми, коли активується новий елемент або при заданому наборі вхідних значень, що забезпечують умови його активації.

Нехай на кожному кроці виконання D-алгоритму до вектору активності додається f-й елемент витримки часу Ej (див. рисунок 3.1). Щоб приєднати елемент Ej до активного шляху, необхідно надати лінії j значення 1, керуючись D-кубами для елемента І-НІ. В результаті на лінії f з'явиться відповідне значення сигналу.

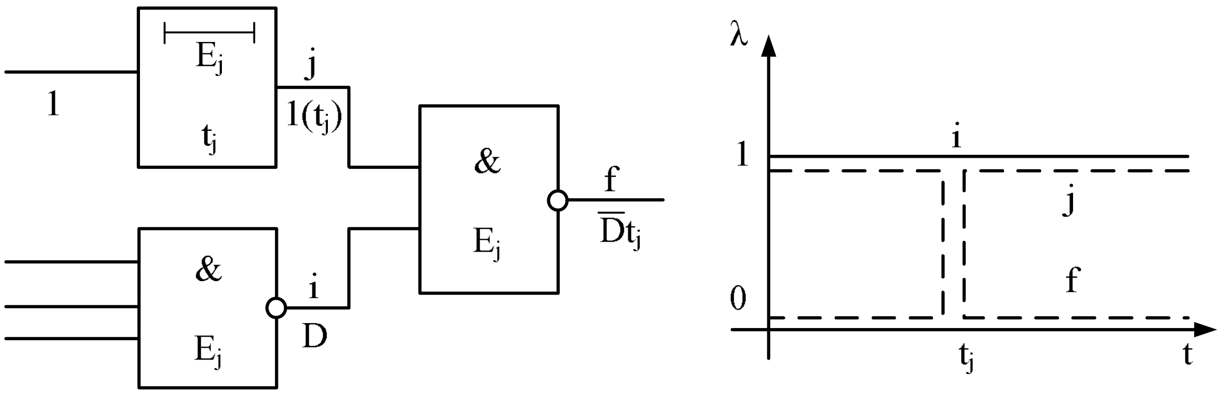


Рисунок 3.1 – Визначення часового D – шляху другого типу

Під час імплікації вхідного сигналу елемента Ej необхідно встановити значення 1. Відповідно до таблиці 3.1, лінія j приймає значення 1 із затримкою часу tj (де tj — витримка часу елемента Ej). Побудуємо графік зміни сигналів на лініях, що належать елементу Ej. З рисунку 3.1 видно, що у справній схемі нульове значення на лінії f з'явиться через проміжок часу tj.

В несправній схемі на лінії f з'явиться одиничне значення . Таким чином, лінія f отримає значення $\overline{D}^t$ (див. таблицю 3.1). Такі тимчасові D – куби будемо називати D – кубами другого типу.

Завдання полягає в тому, щоб "перенести" сформований тимчасовий D-куб до виходу схеми. Для реалізації такої передачі необхідно виконати операцію перетину тестового куба з D-кубами відповідних елементів.

Якщо прийняти момент подачі тестового набору за початок відліку часу, а момент фіксації вихідних реакцій схеми — за час, що перевищує максимально можливу затримку поширення сигналу, тоді часові D-куби трансформуються у звичайні D-куби:

$$t_k > t_{p.\max.} \Rightarrow D^t \equiv D; \quad D_t \equiv D; \quad \overline{D}^t \equiv \overline{D}; \quad \overline{D}^t \equiv \overline{D}, \qquad (3.2)$$

де t_k – час контролю; $t_{p.max.}$ – максимально можлива витримка розповсюдження сигналу в схемі.

Таким чином, виходячи із (3.2) у випадку приєднання елемента на одному із входів якого з'явилось значення D^t, D_t, або $\overline{D}^t$ в актевізований шлях необхідно включити звичайний D – куб елемента. Далі для відновлення часового D – куба, символ $\boldsymbol{t}$ фіксується у значенні $D(\overline{D})$ на тому ж місці, що і у значення на вході. Така умова дозволяє побудувати одномірні часові D – шляхи, тобто шляхи які залежать тільки від одного елемента витримки часу.

Якщо в результаті D-руху на двох або більше входах елемента E_i виникають значення, що залежать від часу, то вихідному сигналу цього елемента присвоюється позначення ∞.

Це означає, що отримане значення на цій лінії необхідно фіксувати при $t_k > t_{p.\max.}$. Отже, одномірний часовий D-шлях ніби переривається, але це не означає, що спрацьовування елемента з витримкою часу, який активував цей часовий D-шлях, залишається поза контролем. У такій ситуації можна сформувати інший активний шлях, вибравши новий елемент, або ж використати інший D-куб цього елемента як початковий.

Після реалізації D – алгоритма утворюється множина несправностей які не реалізуються і які можна виявити тестовими діями. Якщо побудовано звичайний D – шлях, то подальше збільшення глибини діагностування можна досягнути подачею нової тестової дії, або контролем в середині схеми.

Якщо існує часовий D-шлях, це дає змогу більш точно визначити область для подальшого пошуку. Припустимо, що на початковому стані елементи з витримкою часу в схемі не активовані. Наявність тимчасового D-шляху у деяких випадках дозволяє уточнити межі подальшого пошуку.

Розглянемо процес побудови тимчасового D-шляху, виходячи з того, що на початковому етапі елементи витримки часу залишаються неактивованими. Якщо в результаті побудови D – шляху і визначенні тестового набору **T** на виході схеми отримано одне із значень $D^t, D_t, \overline{D}^t$, або $\overline{D}^t$, то часова шкала роботи схеми розбивається на три інтервала:

$$0 \le \tau_1 \le t_i - \Delta t_i; \tag{3.3}$$

$$t_i - \Delta t_i \le \tau_2 \le t_i + \Delta t_i; \tag{3.4}$$

$$t_i + \Delta t_i \le \tau_3 \le t_k, \tag{3.5}$$

де t_i – час спрацювання *i*-го елемента витримкм часу; Δt_i – допустиме відхилення на час спрацювання *i*-го елемента.

Введемо позначення: якщо на відрізку часу $\tau_{\alpha\text{-}\beta}$ значення сигналу на лінії змінюється із 0 до t, то цій зміні надамо значення П, а якщо значення зміниться від 1 до 0 то $\overline{\Pi}$. Нехай тестовий набір виділяє множину ліній S_T, на яких зявились значення D або $\overline{D}$, тоді множина S_{1T} має номера ліній, виникнення визначеного типу несправності на одній із яких, викликає активізацію елемента E_i тільки після подання тестового набору **T**. Множина S_{2T} має номера таких ліній, що поява несправності визначеного типу на одній із них викликає ефект миттєвого спрацювання елемента E_i. При цьому $S_{1T} \cup S_{2T} = S_T$.

Розглянемо діагностичні можливості значення $\overline{D}^t$. Будемо фіксувати значення функції *f*, які реалізуються схемою при дії тестового набору **T**, в інтервалах τ_1,τ_2,τ_3 згідно (2.12). Можливі п'ять наступних варіантів:

1) $f(T,\tau_1)=1, \quad f(T,\tau_2)=\overline{\Pi}, \quad f(T,\tau_1)=0$.

Отже, можна зробити висновок, що несправності, які належать до множини S_T, у схемі відсутні. Час витримки елемента *Ei* перебуває в межах допустимих значень.

2) $f(T,\tau_1)=\overline{\Pi}, \quad f(T,\tau_2)=f(T,\tau_3)=0$.

Результат, який ми отримали, засвідчує відсутність несправностей із множини S_T, але витримка часу елемента E_i зменшена;

3) $f(T,\tau_1)=f(T,\tau_2)=1, \quad f(T,\tau_3)=\overline{\Pi}$.

Несправностей із множини S_T немає, але витримка часу елемента E_i збільшена;

4) $f(T,\tau_1)=f(T,\tau_2)=f(T,\tau_3)=1$.

Це позначає, що фіксується множина S_T. час спрацювання елемента E_i не перевіряється;

5) $f(T,\tau_1)=f(T,\tau_2)=f(T,\tau_3)=0$,

Такий результат може дати або зменшення до нуля витримки часу елемента E_i *,* або несправність, яка викликає ефект миттєвого спрацювання елемента витримки часу, тому зразу фіксується множина S_{2T} . Значення $D^t, D_t, \overline{D}_t$ визначають з врахуванням таблиці 3.1. Отримані результати демонструють високу ефективність при створенні тестів для схем релейного захисту та автоматики (РЗА). Це пов'язано з тим, що РЗА мають каналізовану структуру, де робота кожного каналу відбувається незалежно від інших. Завдяки наявній надлишковості в схемі можлива побудова тимчасових D-шляхів, що виходять від кожного елемента з витримкою часу.

3.2 Синтез вмонтованих засобів діагностування

Діагностику засобів релейного захисту та автоматики (РЗА) під час їхньої нормальної роботи найдоцільніше виконувати за допомогою вмонтованих локальних засобів. Такі вмонтовані засоби діагностування складаються з набору індикаторів відмов пасивного та активного типів. Пасивні індикатори використовуються для функціонального (робочого) діагностування, при якому не передбачена подача спеціальних тестових сигналів — аналіз проводиться на основі робочих сигналів.

Індикатор відмов — це логічний пристрій, який має зв'язок із низкою контрольних точок на входах, виходах (К) та в структурі РЗА і виконує аналіз сукупності сигналів згідно з заздалегідь визначеною програмою [14, 15, 16].

Індикатори відмов бувають двох типів: такі, що самодіагностуються, і такі, що не мають цієї здатності. Перші є більш складними і здатні сигналізувати про несправність як самого пристрою РЗА, так і його окремих елементів, що підвищує надійність експлуатації.

Пасивні індикатори використовують інформацію, яка надходить у процесі роботи захисту, що діагностується. Активні індикатори, у свою чергу, можуть періодично стимулювати роботу пристроїв РЗА штучними впливами або запобігати хибним спрацюванням.

Активні індикатори відмов володіють розширеними функціональними можливостями, забезпечуючи як тестове, так і робоче діагностування. На рисунку 3.2 представлена структура пристрою РЗА з інтегрованими індикаторами відмов, де показано підключення пасивного індикатора, входи якого з'єднані з лініями, що зв'язують індикатор із входами пристрою $(x_0,\ldots x_{m-1})$; виходами $(z_0,\ldots z_{n-1})$ і контрольними точками (1,...1) пристрою РЗА. Кола внутрішніх контрольних точок мають позначення символами $(y_1 \ldots y_i)$.

Активний індикатор відмов (див. рисунок 3.2 б) окрім сигналізації про помилкові, надлишкові спрацювання та відмови в роботі, виконує також блокування роботи пристрою у випадках неправильної роботи першого та другого типів, а у разі відмови третього типу забезпечує відключення об'єкта. Для реалізації цих функцій у схему додано комутуючий елемент.

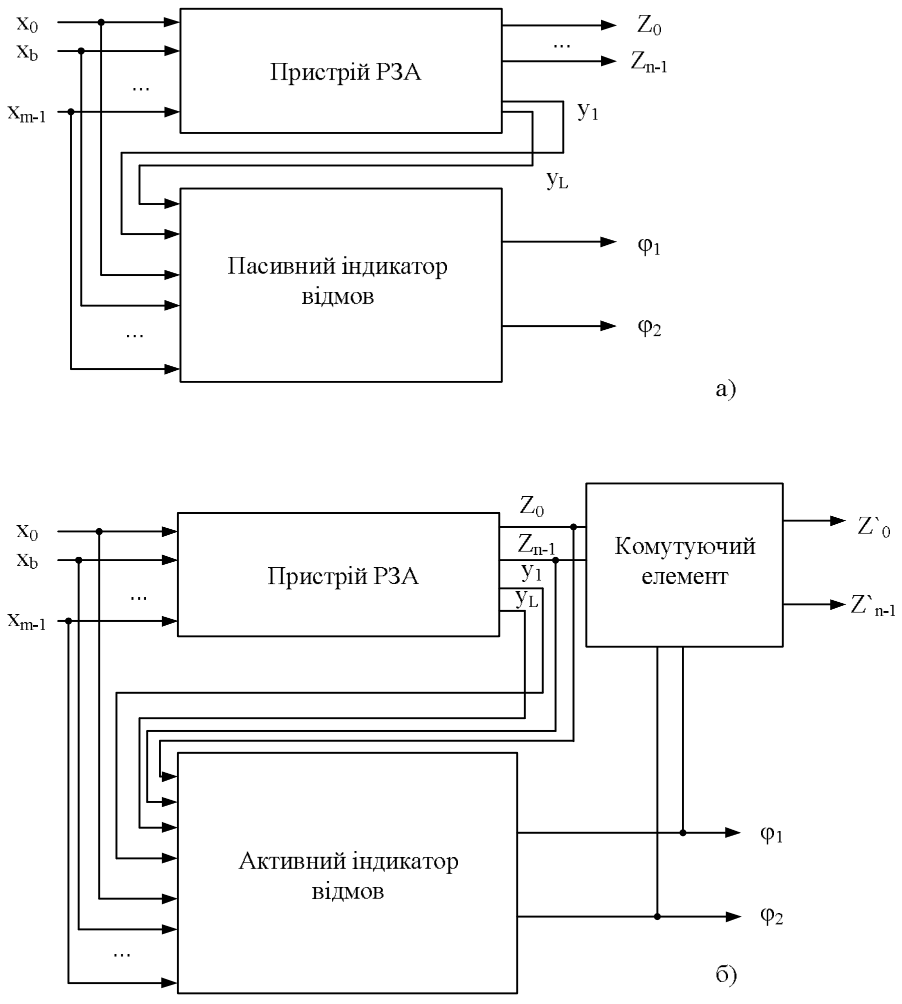


Рисунок 3.2 – Схема включення пристрою РЗА і індикатора відмов: пасивного (а) і активного (б)

Структура індикатора відмов формується шляхом виконання таких операцій:

1. Побудова таблиці станів справного пристрою РЗА - таблиця функцій F_{C0} .(1.1).

2. Побудова табличних функцій несправностей $F_c(0 \to 1)$ і $F_c(1 \to 0)$ для виходу $z_c(c = 0,1 \ldots n-1)$.(1.2,1.3) .

3. Записати у вигляді таблиць станів умови роботи індикатора відмов (таб. 3.2, 3.3), причому в таб. 3.2 в якості робочих станів записуються стани із таблиці функцій несправностей $F_c(0 \to 1)$, а в якості заборонених - стани із таблиці F_{C0}, що є умовою роботи індикатора відмов, який фіксує несправності типу $(0 \to 1)$ (хибні спрацювання). Аналогічно складається таб. 3.3, яка визначає умови роботи індикатора відмов, що фіксує несправності типу $(1 \to 0)$ (не спрацювання пристрою РЗА), тільки в якості робочих станів записують стани із таблиці функцій несправностей $F_c(1 \to 0)$. Сигнал на виході індикатора відмов затримується на часі $(t_{\max} + \Delta t)$, де $t_{\max}$ - максимальний час спрацювання пристрою, що діагностується.

4. Мінімізація булевих функцій $F_c(0 \to 1)$ і $F_c(1 \to 0)$, які представлені таблицями станів, і формування структурних формул індикатора відмов.

5. Реалізація структури індикатора відмов на заданому типу елементів.

Таблиця 3.2 – Умови функціонування (0-1) індикатора відмов.

x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	Z_C	φ_{2C}
x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	1	1
…	…	…	…	…	…	…
x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	1	1
…	…	…	…	…	…	…
x_{0h}	…	x_{bh}	…	$x_{(m-1)h}$	1	1
x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0h}	…	x_{bh}	…	$x_{(m-1)h}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0g}	…	x_{bg}	…	$x_{(m-1)g}$	1	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0u}	…	x_{bu}	…	$x_{(m-1)u}$	1	0

Таблиця 3.3 – Умови функціонування (1-0) індикатора відмов.

x_0	…	$x_в$	…	x_{m-1}	Z_C	φ_{1C}
x_{0p}	…	$x_{вp}$	…	$x_{(m-1)p}$	0	1
…	…	…	…	…	…	…
x_{0g}	…	$x_{вg}$	…	$x_{(m-1)g}$	0	1
…	…	…	…	…	…	…
x_{0u}	…	$x_{вu}$	…	$x_{(m-1)u}$	0	1
x_{00}	…	$x_{в0}$	…	$x_{(m-1)0}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0i}	…	$x_{вi}$	…	$x_{(m-1)i}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0h}	…	$x_{вh}$	…	$x_{(m-1)h}$	0	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0p}	…	$x_{вp}$	…	$x_{(m-1)p}$	1	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0g}	…	$x_{вg}$	…	$x_{(m-1)g}$	1	0
…	…	…	…	…	…	…
x_{0u}	…	$x_{вu}$	…	$x_{(m-1)u}$	1	0

Принцип побудови індикатора відмов залишається незмінним для пристроїв будь-якого типу. Відмови в пристроях РЗА можуть виникати як одночасно, так і у вигляді множинних несправностей. Проте, завдяки безперервному та періодичному тестовому діагностуванню, зазвичай виявляється саме перша несправність, яка потім усувається, відновлюючи справність пристрою. Це дозволяє вважати, що найбільш поширеними є одиночні відмови. Водночас можливі і множинні залежні несправності, коли одна несправність спричиняє появу інших до її усунення. Крім того, несправності можуть виникати і в самому індикаторі відмов, що призводить до помилкових сигналів на його виходах, тому індикатор повинен мати можливість діагностувати власну працездатність.

Розглянемо роботу індикатора відмов функціонального діагностування, який має два виходи φ_1 і φ_2 на першому із яких з'являється одиничний сигнал при відмові типу $(0 \to 1)$, а на другому при відмові типу $(1 \to 0)$.

Індикатори відмов, що самі діагностуються можуть бути синтезовані при умові введення додаткового виходу φ_3, який є контрольним по відношенню до двох інших (φ_1 і φ_2). Стан цього виходу визначають таким чином. Якщо в стрічці таблиці станів, це описує функціонування індикатора відмов $\varphi_1 \vee \varphi_2 = 1$ то $\varphi_3 = 0$ і коли $\varphi_1 \vee \varphi_2 = 0$, то $\varphi_3 = 1$, тоді любий перехід до стану виходів коли $\varphi_1 \vee \varphi_2 \vee \varphi_3 = 0$ засвідчує, що виникає несправність індикатора відмов.

Такий індикатор відмов здатен виявляти всі одиночні несправності як у самому пристрої РЗА, так і у своїй власній структурі, а також частково діагностує подвійні несправності, коли одна з них знаходиться в РЗА, а інша — в індикаторі відмов.

Діагностика двократних несправностей можлива в тих випадках, коли вони компенсують одна одну стосовно вихідних сигналів індикатора і не призводять до одночасної зміни станів двох його виходів.

В якості індикатора розглянемо таблицю станів (таб. 3.4) в якій x_1, x_2, x_3 - вхідні змінні пристрою РЗА, що діагностується; Z - його вихід; φ_1, φ_2, φ_3 - виходи індикатора відмов. Перші дві верхні стрічки таблиці характеризують стан входів - виходу пристрою РЗА при відмовах типу $(0 \to 1)$, коли $\varphi_1 = 1$, наступні три стрічки - стани при відмовах типу $(1 \to 0)$, коли $\varphi_2 = 1$, нижні п'ять стрічок таблиці відповідають станам справного пристрою РЗА. Стовпчик φ_3 - контрольний, який забезпечує при синтезу індикатора відмов - його самодіагностування.

Таблиця 3.4 – Таблиця станів пристрою РЗА і індикатора відмов

№	x_1	x_2	x_3	Z	φ_1	φ_2	φ_3
1	0	0	0	1	1	0	0
2	0	1	0	1	1	0	0
3	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	1	0
5	1	1	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1
7	1	0	1	1	0	0	1
8	0	1	1	1	0	0	1
9	1	1	0	1	0	0	1

Виконаємо мінімізацію булевих функцій заданих таблицею 3.2 і отримаємо структурні формули індикатора відмов при відмовах типу $(0 \to 1)$ $(1 \to 0)$ і контрольного з виходом φ_3:

$$\left.\begin{aligned} &\phi_1 = \overline{x}_1\overline{x}_3 Z;\quad \phi_2 = x_1\overline{Z} + x_3\overline{Z}; \\ &\phi_3 = x_1 Z + x_3 Z + \overline{x_1 x_3 Z}. \end{aligned}\right\} \tag{3.6}$$

Аналіз останніх виразів показав, що введення додаткового (контрольного) виходу φ_3 приводить до подвоєння витрат на створення індикатора відмов, тобто отримана дубльована структура індикатора. Для реалізації самодіагностування індикатора відмов необхідно виконати умову роздільного виконання його функцій. φ_1, φ_2, φ_3 обов'язково, так як при такій його побудові будь-яка одинична несправність в індикаторі відмов приведе до інвертування тільки одного виходу і сума $\varphi_1 \vee \varphi_2 \vee \varphi_3$ стане дорівнювати нулю.

Застосування індикатора відмов із трьома виходами дозволяє виявляти несправності з деталізацією до рівня пристроїв РЗА або самого індикатора. Так стан виходів $\varphi_1\varphi_2\varphi_3 = 100$ позначає про наявність в пристрої РЗА несправності типу $(0 \to 1)$, $\varphi_1\varphi_2\varphi_3 = 010$ - несправності типу $(0 \to 1)$, $\varphi_1\varphi_2\varphi_3 = 101, 011$ - несправності в індикаторі відмов і пристрої РЗА, $\varphi_1\varphi_2\varphi_3 = 000$ - несправності в індикаторі відмов. Індикатор відмов, виконаний за таким принципом потребує подвоєння апаратурних витрат.

Розглянемо альтернативний підхід до синтезу самодіагностованих індикаторів відмов. Припустимо, що умови роботи індикатора відмов задані у вигляді таблиці станів контрольних точок, а також входів і виходів пристрою РЗА (табл. 3.5), де робочими вважаються підмножини станів контрольних точок A' справного пристрою.

Таблиця 3.5– Таблиця станів пристрою РЗА і індикатора відмов.

	a_1	a_2		a_3	x_1	x_2	x_3	Z	φ_1	φ_1
A'XZ	0	0		0	0	0	0	0	1	0
	0	1		1	0	0	1	0	1	0
	1	0		0	0	1	0	0	1	0
	1	0		1	1	0	0	0	1	0
	0	0		1	0	1	1	1	0	1
	1	0		1	1	0	1	1	0	1
	1	0		0	1	1	0	1	0	1
	1	0		1	1	1	1	1	0	1
A''XZ	0	0		1	0	0	0	1	0	0
	0	0		1	0	0	1	1	0	0
	1	0		1	0	1	0	1	0	0
	0	0		1	1	0	0	1	0	0
	0	0		1	0	1	1	0	1	1
	1	0		0	1	0	1	0	1	1
	0	1		0	1	1	0	0	1	1
	0	1		0	1	1	1	0	1	1

Індикатор відмов який може сам діагностуватись повинен мати як мінімум два виходи φ_1 і φ_2 для того, щоб забезпечити розпізнавання вихідних станів в ситуаціях з виникненням несправностей і без них. Так задавши виходам φ_1, φ_2 стани 01 або 10 для справного стану пристрою РЗА і індикатора відмов і стан 00 або 11 у випадку, коли з'являється несправності, можна діагностувати одиничні і подвійні несправності. Реалізація функцій φ_1 і φ_2 повинна бути розділена.

Суттєвим для апаратурних витрат при реалізації індикатора відмов є спосіб присвоювання значень φ_1 і φ_2 в таблиці станів. Цей спосіб повинен гарантувати при наступному синтезі індикатора відмов отримання булевих функцій φ_1 і φ_2 близьких до лінійних. Ця задача має ряд рішень в теорії кінцевих автоматів.

Розглянемо приклад синтезу індикатора відмов, що діагностується пристрою РЗА, що має контрольні точки $\{a_1, a_2, a_3\}$, входи $\{x_1, x_2, x_3\}$ і вихід Z. Значення φ_1 і φ_2 заносять в таблицю станів з виконанням умов:

1) $\varphi_1 \ \varphi_2 = \{01, 10\}$ при справних пристроях РЗА і індикатора відмов $\varphi_1 \ \varphi_2 = \{01, 10\}$ при несправних пристроях РЗА і індикаторі відмов

2) в додаткових таблицях відмов пристрою РЗА типу $(0 \to 1)$ і $(1 \to 0)$ стани φ_1, φ_2 повинні бути однаковими.

В прикладі в додатковій таблиці відмов типу $(0 \to 1)$ стани $\varphi_1 \ \varphi_2 = 00$, а типу $(1 \to 0)$ стани $\varphi_1 \ \varphi_2 = 11$. Виконання другої умови доцільно з точки зору забезпечення можливості розрізняти виникаючі відмови пристроїв РЗА по типам. Мінімізація функцій φ_1 і φ_2 дає один із частинних рішень, які можна подати структурними формулами

$$\left.\begin{aligned} \phi_1 &= \overline{a}_1\overline{Z} + \overline{a}_2\overline{Z} = \overline{(a_1+Z)(a_2+Z)}; \\ \phi_2 &= a_3x_1Z + \overline{a}_3x_2Z + x_2x_3\overline{Z} + \overline{a}_3x_2\overline{Z}. \end{aligned}\right\} \tag{3.6}$$

Схема індикатора відмов, що може само діагностуватись пристрою РЗА, зображено на рисунку 3.3. Із таблиці 3.2 видно, що відмова пристрою РЗА типу $(0 \to 1)$ приводить до стану $\varphi_1 \ \varphi_2 = 00$, а типу $(1 \to 0)$ - стану $\varphi_1 \ \varphi_2 = 11$ (при відсутності несправностей в індикаторі відмов) тому доповнивши схему індикатора елементами, які реалізують функцію

$\bar{\varphi}_1\bar{\varphi}_1 = \overline{\varphi_1 + \varphi_2} = \varphi_{(0\to1)}\varphi_1\varphi_2 = \varphi_{(1\to0)}$ можна діагностувати пристрій РЗА з глибиною до типу відмови.

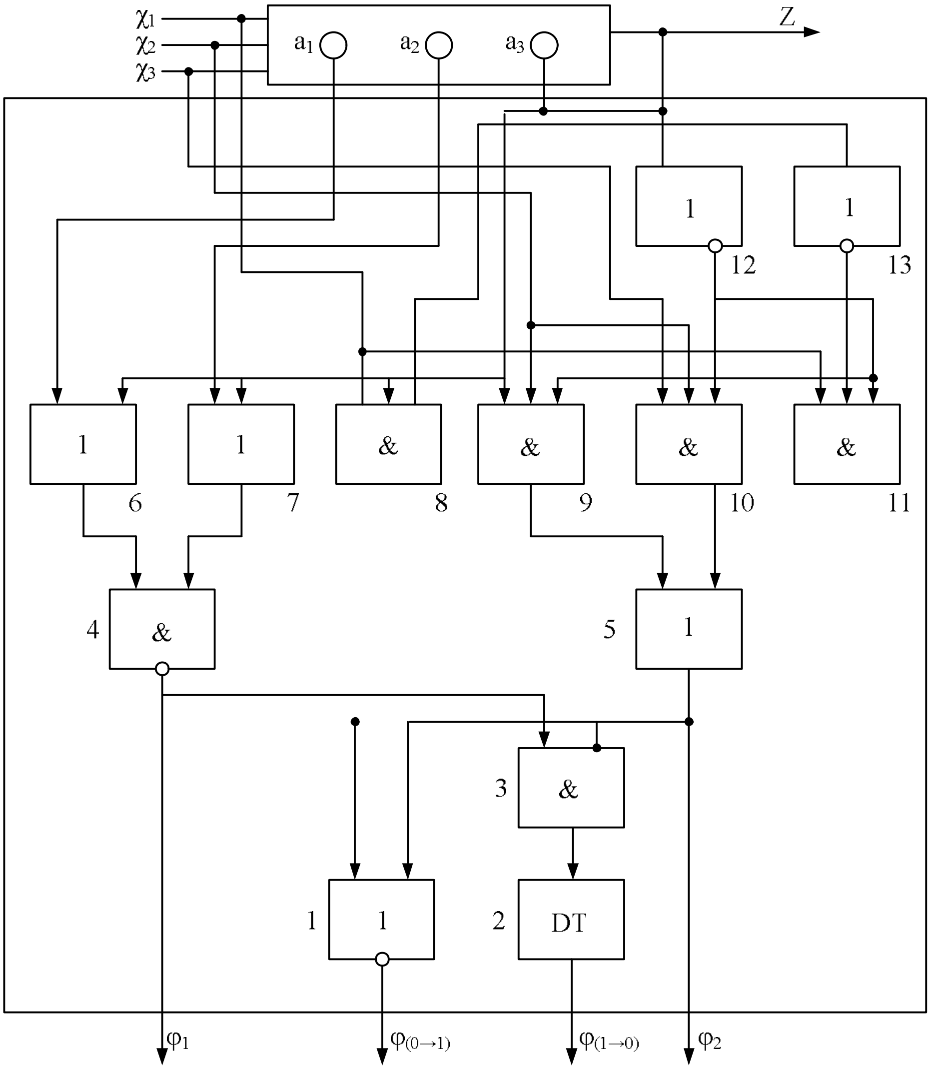


Рисунок 3.3 – Схема індикатора відмов, що діагностується пристрою РЗА

3.3 Приклад реалізації *D* - алгоритму

Розглянемо побудову *D* – алгоритму на прикладі дистанційного захисту ШДЭ-2801 [7, 17]

Виділимо частину схеми захисту, яка забезпечує проходження сигналу при виникненні короткого замикання у другій зоні дії (див. рисунок 3.4). Для створення тесту схема була перетворена на комбінаційну шляхом розриву зворотних зв’язків (елементи D6.1, D3.2 та тригер DS4).

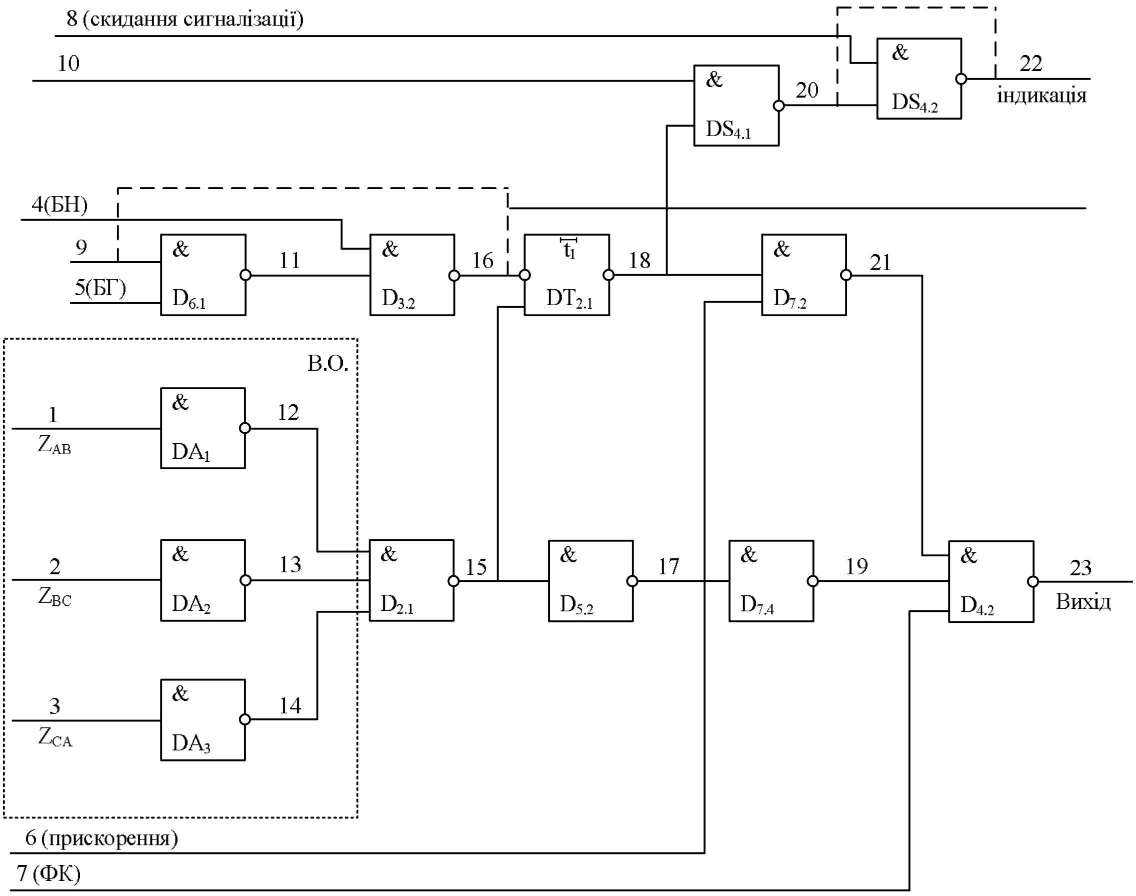


Рисунок 3.4 – Фрагмент логічної частини схеми дистанційного захисту

В результаті цього з'явилися два додаткові псевдовходи під номерами 9 та 10, а також псевдовихід під номером 13. Решта входів і виходів відповідають їхнім функціональним призначенням: входи 1-3 — це входи вимірювального органу (ВО); вхід 4 — від блокування у випадку несправностей у ланцюгах напруги (БН); вхід 5 — від блокування при коливаннях повільно діючих ступенів (БГ); вхід 6 — від ланцюга прискорення другого ступеня; вхід 7 — від схеми функціонального контролю (ФК); вхід 8 — від кнопки скидання сигналізації; вихід 22 — сигналізує про спрацювання другого ступеня з більшою витримкою часу; вихід 23 — основний вихід захисту.

Розглянемо порядок побудови тестового набору для несправності $\equiv 1$ на лінії 12. Так як несправність відноситься до виходу елемента DA1, то його входу необхідно присвоїти таке значення, яке дає в справній схемі на лінії 12 значення сигналу, яке відрізняється від його значення 1 на лінії 1. Тоді лінії 12 присвоїмо значення $\overline{D}$. Етапи побудови D – шляху показані в таблиці 3.6.. Перший етап реалізації D – алгоритму закінчено: на лінії 12 отримано значення $\overline{D}$.

Другий етап розпочинається зі створення вектора активності, куди додаються продовження лінії 12 — лінії 15 та 4. Потім виконуємо D-просування через елемент D2.1. Оскільки цей елемент виконує функцію І-НІ, єдиним способом підключити його до активного шляху є присвоєння значення 1 всім його входам з невизначеними значеннями (лінії 13 і 14). В результаті лінія 15 отримує значення D. Аналогічний результат виходить при перетині відповідного куба елемента D2.1 з тестовим кубом.

Для підтримки отриманих значень сигналів на лініях 13 та 14, на лініях 2 і 3 присвоюємо нульові значення. З вектора активності виключаємо лінію 15 і додаємо лінії 16 та 17. D-просування через елементи D3.2 та D5.2 проводимо так само, як і на попередньому кроці.

В вектор активності включаємо лінії 18 і 19.

На наступному кроці із вектора активності виключаємо елементи витримки часу DT2.І. Умовою активізації цього елемента є поява нульового сигналу на вході. Лінія 18 отримує значення $\overline{D}^t$.Тут t - витримка часу елемента DT2.1. Із вектора активності виключаємо лінію 18, а включаємо лінії 20 і 21.

На наступному етапі до активізованого шляху додаємо лінію 19, яка набуває значення D. Елемент D7.4 вилучаємо з вектора активності і замінюємо його на елемент D4.2. Після цього знову звертаємося до вектора активності. Для виконання D-просування через елемент DS4.1 присвоюємо лінії 20 відповідне значення D^t.

Таблиця 3.6 – Етапи реалізації D-алгоритма

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1											$\overline{D}$											
	0	0									$\overline{D}$	1	1	D								
			1	0						1				D	$\overline{D}$							
														D		$\overline{D}$						
															$\overline{D}$		$\overline{D}^t$					
																$\overline{D}$		D				
									1								$\overline{D}^t$		D^t			
					1												$\overline{D}^t$			D^t		
							1												D^t		$\overline{D}^t$	
						1												D		D^t		$\overline{D}^t$
1	0	0	1	0	1	1	1	x	1	1	$\overline{D}$	1	1	D	$\overline{D}$	$\overline{D}$	$\overline{D}^t$	D	D^t	$\overline{D}^t$	$\overline{D}^t$	$\overline{D}^t$
							0	x	x												1	
			0							x				x	1							
0	0	0	0	0	1	1	0															

В вектор активності заносимо елемент DS4.2, а виключаємо елемент DS4.1. Приєднуємо до активізованого шляху лінію 21. Лінії 6 присвоюємо значення t, тоді лінія 21 отримає значення D^t. Із вектора активності виключаємо елемент D7.2.

На наступному кроці до активізованого шляху приєднуємо лінію 22. Лінії 8 присвоюємо значення 1, тоді лінія 22 отримає значення $\overline{D^t}$. Ми досягли, один із виходів,однак вектор активності ще не має елемента D4.2. Приєднання цього елемента до суттєвого шляху здійснюємо за допомогою перетину подвійного D-куба елемента D4.2 з тестовим кубом. Внаслідок перетину лінії 7 отримаємо значення 1, а лінія 23 - значення $\overline{D^t}$.

Другий етап реалізації D-алгоритму закінчено. Тестовий куб має вигляд: $T = (1,0,01,0,1,1,1,x,1,1,\overline{D},1,1,D,\overline{D},\overline{D},\overline{D^t},D,D^t,D^t,\overline{D^t},\overline{D^t})$.

Аналізуючи його, приходимо до висновку, що необхідно перейти до копії C_{j-1} для визначення послідовності вхідних дій, які необхідно облаштувати, так як псевдо вхід 10 схеми має значення 1. В копії C_{j-1}, це значення присвоюємо лінії 22 і здійснимо процедуру забезпечення цього значення.

Візьмемо вироджений куб елемента DS4.2 (0, x, 1) з координатами 8, 20, 22. Цей куб забезпечує невизначене значення сигналу на лінії 10 в копії C_{j-1}. Для визначення послідовності вхідних дій введемо ще одне обмеження - недопустимість активізації елемента витримки часу. Щоб забезпечити значення 1 на лінії 16, можна взяти для елемента D3.2 вироджений куб (0, x, x, 1) з координатами 4,11,15,16.

Для визначення значень на розглянутих лініях схеми використано таку вхідну послідовність: H = (0,0,0,0,0,1,1,0), (1,0,0,1,0,1,1,1). Повний набір тестових сигналів для перевірки роботи схеми наведено в таблиці 3.7. У ній також наведені типи несправностей, що контролюються, та відповіді сигналів на виходах схеми. Позначені одиниці зі зірочкою вимагають подачі установчих вхідних послідовностей.

Виділимо множину ліній з несправностями на них, які викликають ефект миттєвого спрацювання елемента DT2.1. Для виходу 22 $S_2^{22} = (16_0, 18_0, 20_1, 22_0)$; для виходу 23 $S_2^{23} = (6_0, 16_0, 18_0, 21_1, 22_0)$.

Поява результату $f(T, \tau_1) = 1$, $f(T, \tau_2) = \overline{\Pi}$, $f(T, \tau_1) = 0$ на лініях 22, 23 є ознакою того, що в схемі є несправність із множини $S_1 = (12_0, 13_0, 14_0, 15_1, 17_0, 19_1)$.

Якщо отримані значення $f(T, \tau_1) = f(T, \tau_2) = f(T, \tau_3) = 0$, то необхідно дослідити множини S_2^{22}, S_2^{23}.

Подальший процес діагностики несправностей дозволяє розрізняти сигнали на лініях 22 та 23, що сприяє підвищенню глибини діагностування і можливості виявлення множинних несправностей. Водночас, ігнорування часових D-кубів під час побудови тестового куба суттєво знижує глибину діагностики, що негативно впливає на ефективність D-алгоритму і призводить до збільшення часу проведення діагностування.

3.4 Оптимізація програми діагностування

Мета оптимізації діагностування — мінімізувати витрати часу та матеріальних ресурсів на виявлення несправності.

Оптимізація може виконуватися двома шляхами:

- вибором мінімально необхідного набору тестових дій і контрольних точок з усієї множини;
- визначенням найбільш раціональної послідовності проведення діагностичних процедур.

За наявності статистичних даних про надійність елементів об’єкта діагностування можливо заздалегідь розрахувати ймовірність відмови кожного елемента та сформувати оптимальну програму пошуку несправності з урахуванням цих даних. Для одного й того самого об’єкта можна побудувати багато різних схем діагностики.

Таблиця 3.7 – Тестові дії і несправності, що діагностуються на рисунку 3.3.

Тестові дії на входи схеми								Типи несправностей на лініях схеми																		Сигнал на виході схеми	
1	2	3	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	22	23
0	0	0	1	0	1	1	1^*							0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	D_t	D_t
1	0	0	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0	1			0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}^t$	$\overline{D}^t$
0	1	0	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0		1		0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}^t$	$\overline{D}^t$
0	0	1	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0			1	0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}^t$	$\overline{D}^t$
1	0	0	0	0	1	1	1^*	1		0								0	0			1	1	0	0	$\overline{D}^t$	D_t
1	0	0	1	1	1	1	1^*		0				1					0		0		1	1	0	0	$\overline{D}_t$	D_t
1	0	0	0	1	0	1	1^*			1	0												0		1		$\overline{D}$
1	0	0	1	0	0	0	0				1	1												0	0	D	D

Критерієм вибору найкращої схеми пошуку несправностей є мінімізація середнього часу їх виявлення. Тобто, оптимальна схема забезпечує найменший середній час пошуку несправності в процесі діагностування:

$$T_{виз} = \sum_{k=1}^{L} t_k / p_k \, , \tag{3.17}$$

де t_k - сумарний час всіх перевірок, необхідних для пошуку k-ого елемента, який відмовив; p_k - ймовірність того, що відмова об'єкта діагностування зумовлена несправністю k-ого елемента. L- кількість каналів.

Цей критерій застосовується при організації діагностичних перевірок за методом час-ймовірність, суть якого полягає у поетапному зменшенні множини можливих причин несправностей до єдиної конкретної. Завдяки цьому загальна кількість потенційних несправностей послідовно звужується, що дозволяє ефективно і швидко локалізувати несправність.

В даному випадку будують спочатку безумовний алгоритм у вигляді перевірок з співвідношенням t_k / p_k , починаючи з найменшого, а потім перебудовують його в умовний [5, 7 ,18]

Якщо час перевірки елементів однаковий, то можна застосувати таке правило побудови програми перевірки.

Спочатку всі ***n*** елементів РЗА розташовуємо в ряд в порядку зменшення ймовірності його пошкодження, два елемента, що мають найменшу ймовірність, об'єднують в один елемент $p = p_n + p_{n-1}$. Новий елемент по величині ***p*** вставляють в існуючий ряд елементів. Процес повторюють до тих пір, доки всі елементи не об'єднаються в один з ймовірністю $p_{\Sigma} = 1$, В побудованому алгоритмі пошуку несправностей вибирають перевірки в порядку зменшення p_k .

Для вибору оптимального алгоритму пошуку використовують критерії середньої вартості пошуку несправностей за виразом

$$C = \sum_{k=1}^{L} g_k \cdot p_k, \tag{3.18}$$

де g_k - вартість перевірки k-ого елемента.

Оптимальний варіант схеми пошуку у випадку рівної вартості тестових дій і неоднакових ймовірностей несправностей може бути знайдений за допомогою методу оптимального кодування.

Для забезпечення мінімальних витрат на реалізацію програми діагностування доцільно застосувати метод гілок і меж (віток і границь). Цей метод базується на представленні об'єкта діагностування у вигляді таблиць несправностей, що дозволяє систематично відсікати неперспективні варіанти та знаходити оптимальний порядок перевірок.Вибираючи будь-яку із перевірок χ і виконавши її, можна розбити множину можливих станів F_k на дві підмножини F_k^0 і F_k^1, які відповідають негативному і позитивному результатам перевірки. Так як послідовність перевірок в отриманих підмножинах нам не відома, то знайти середню вартість будь-якого стану із підмножин F_k^0 і F_k^1 не можна. Середня вартість замінюється її нижньою границею. Вибираючи на кожному етапі побудови умовної програми різні перевірки, можна при заданих множинах $\{F\}$ і $\{\pi\}$ побудувати деяку сукупність умовних програм, які будуть відрізнятися перевірками або послідовністю перевірок. Оптимальною буде така програма, яка має найменшу вартість [18, 19].

В деяких випадках неможливо отримати дані про ймовірність появи певних несправностей у засобах РЗА. Через це застосування інформаційних критеріїв для оптимізації вважається недоцільним, натомість доцільно використовувати критерій розпізнавання.

Метод, заснований на критерію розпізнавання, передбачає подання РЗА у формі таблиці несправностей або таблиці покриття.

Використання критерію розпізнавання пов'язано з двома напрямками оптимізації:

- Зменшення числа тестових операцій та контрольних точок;

- Пошук найкращого порядку виконання перевірок у діагностичній програмі.

Розглянемо, як розв'язати першу задачу. Вона полягає у призначенні вагових коефіцієнтів окремим перевіркам або контрольним точкам та проведенні цілеспрямованого аналізу цих коефіцієнтів, які відображають ступінь здатності елементів тесту (тестових дій і контрольних точок) розпізнавати несправності.

Розглянемо мінімізацію числа тестових дій. Вага $W(\pi_i)$ тестової дії визначається виразом

$$W(\pi_i) = n_0^i \cdot n_1^i, \tag{3.19}$$

де n_0^i і n_1^i - відповідно числа нулів і одиниць в і-й стрічці таблиці функцій несправностей (таблиці покриття). Для всіх тестових дій обчислюють вагу. Потім в якості першої вибирається дія, яка має найбільшу вагу, так як при подачі цієї дії розрізняється найбільше число несправностей.

Після подачі першої дії множина несправностей ділиться на дві підмножини: які визначаються і не визначаються $F_1^1 \cup F_2^1 = F_0$.

На наступних кроках використання критерію розпізнавання необхідно враховувати той факт, що на j-ому кроці множина станів об'єкта діагностування уже розділяється на m підмножин $F_1^j ...,$ F_m^j що не перетинаються і вага тестової дії після j-ого кроку обчислюється за формулою

$$W_i^j = \sum_{k=1}^{m} n_0^i(F_k^j) \cdot n_1^i(F_k^j), \tag{3.20}$$

де $n_0^i(F_k^j)$ - число нулів в і- й стрічці, $n_1^i(F_k^j)$ - число одиниць в і-й стрічці підмножини F_k^j .

Тестова дія, для якої W_i^j має найбільше значення, вибирається як $(j+1)$ дія програми діагностування.

Тестові дії обираються до моменту, поки сумарна вага усіх невикористаних дій не стане рівною нулю, тобто доки не припиниться поділ підмножин станів об’єкта діагностування.

У випадку блочного представлення моделі РЗА деталізувати інформацію про окремі несправності всередині блоку не обов’язково. Проте інформація про стан кожного блоку може бути використана для оптимізації кількості тестових дій (контрольних точок) за допомогою критерію розпізнавання.

Оскільки не потрібно розрізняти попарні несправності, що належать одному блоку, з ваги дії (контрольної точки) (3.21) слід виключити вагу, пов’язану з такими парами несправностей, які розпізнаються цією дією і належать одному й тому ж блоку. З урахуванням цього вага тестової дії обчислюється за формулою:

$$W_i^j = \sum_{k=1}^{m}\left[n_0^i(F_k^j)\cdot n_1^i(F_k^j) - \sum_{i=1}^{p} n_0^i(F_k^j)_i \cdot n_1^i(F_k^j)_i \right], \qquad (3.21)$$

де $n_0^i(F_k^j)_i$ - число нулів в і-й стрічці; $n_1^i(F_k^j)_i$ - число одиниць в і-й стрічці підмножини F_k, зв'язаного з блоком B_i, p - число блоків, зв'язаних з підмножиною станів F_k^j .

Застосування теорії інформації при розробці оптимальних програм діагностування дає змогу враховувати як обсяг інформації, що надають окремі перевірки, так і ймовірність появи різних несправностей.

Розглянемо рішення задачі оптимізації програм діагностування при двійковому представлені реакції. Нехай в склад пристроїв РЗА входять L елементів, для яких відомі ймовірності виходу зі строю $p_i,...p_k,...p_L$, обраховані при умові, що події, які пов'язані із пошкодженням елементів, утворюють повну групу подій, тобто $\sum_{k=1}^{L} p_k = 1, \quad k = 1,2,...L.$. Позначимо реакцію пристрою, яка відповідає станам входів χ_i при несправностях F_i, через R_i^L. Потрібно знайти таку послідовність подачі вхідних дій, яка дозволяє знайти несправний елемент при мінімальному числу перевірок. Кожна перевірка дає інформацію про стан РЗА і таким чином зменшує невизначеність відносно місця пошкодженого елемента. Невизначеність результату перевірки визначається ентропією

$$H(\chi_i) = -p_{i1}\log_2 p_{i1} - p_{i0}\log_2 p_{i0} \qquad (3.22)$$

де p_{i1}, p_{i0} - суми ймовірностей несправностей, які при вхідній дії χ_i дає результат 1 або 0 відповідно.

Довжина програми перевірки визначається значеннями приросту інформації про стан об'єкта при подачі кожної вхідної дії, тому вибір послідовності тестових дій починається з дії χ_i , що несе найбільшу кількість інформації, тобто таку, що має максимальну ентропію $H(\chi_i)$.

Після виконання першої дії можливі два варіанти результату: 0 або 1. У зв’язку з цим подальші перевірки розгалужуються, а ентропія наступних кроків у кожному напрямку обчислюється з урахуванням результату першої виконаної дії:

$$\left.\begin{aligned} H^{(0)}(\chi_i) &= -p_{i1}^{(0)}\log_2 p_{i1}^{(0)} - p_{i0}^{(0)}\log_2 p_{i0}^{(0)}; \\ H^{(1)}(\chi_i) &= -p_{i1}^{(1)}\log_2 p_{i1}^{(1)} - p_{i0}^{(1)}\log_2 p_{i0,}^{(1)} \end{aligned}\right\} \qquad (3.23)$$

де $p_{i1}^{(0)}$, $p_{i0}^{(0)}$ - відповідно ймовірності одиничного і нульового результату при умові, що результат подачі першої дії дорівнює нулю; $p_{i1}^{(1)}$, $p_{i0}^{(1)}$ - те ж, але при умові, що результат першої перевірки дорівнює одиниці.

Основним недоліком розглянутого методу тестового діагностування РЗА є обмежена глибина пошуку при локалізації несправності. Для її покращення використовується метод тестування з застосуванням десяткового кодування тимчасових реакцій РЗА. Такі діагностичні тести можна оптимізувати, спираючись на інформаційні підходи, однак це призводить до значного збільшення обчислювальних затрат. Формула для розрахунку ентропії при виборі тестової дії має наступний вигляд:

$$H(\chi_i) = -p_i \log_2 p_i - p_2 \log_2 p_2 - ... - p_v \log_2 p_v \quad , \tag{3.24}$$

де p_1, $p_2 \cdots$ p_v - сума ймовірностей несправностей, які при тестовій дії χ_i дають відповідно результати $1,2...v$.

Далі к перевірок розгалужується на кількість гілок, що відповідає числу можливих результатів першої дії (у наведеному прикладі їх може бути різна кількість). Ентропія тестових дій для кожної гілки визначається за формулою...

$$H^{(j)}(\pi_i) = -\sum p_i^{(j)} \log_2 p_i^{(j)} \tag{3.25}$$

Вибір дії здійснюється за принципом максимізації ентропії. Після визначення першої дії та кожної наступної перевіряється наявність кодів несправностей, які однозначно ідентифікують конкретну несправність (тобто не повторюються при інших несправностях).

Стовпці таблиці функцій несправностей, що відповідають уже виявленим несправностям, надалі в розрахунках не враховуються.

При визначені тестової дії на j-ому кроці програми маємо:

$$\begin{aligned} H^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})}(\chi_i) = -p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} \log_2 p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} - \\ - p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} \log_2 p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} - \ldots - p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} \log_2 p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,1})} \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned} H^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})}(\chi_i) = -p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} \log_2 p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} - \\ - p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} \log_2 p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} - \ldots - p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} \log_2 p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,2})} \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned} H^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})}(\chi_i) = -p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} \log_2 p_1^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} - \\ - p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} \log_2 p_2^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} - \ldots - p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} \log_2 p_v^{(R_1,R_2 \ldots R_{i-2,v})} \end{aligned} \tag{3.28}$$

.

Середнє число перевірочних процедур для пошуку несправностей визначається як

$$C_{сер} = \sum_{i=1}^{|S|} c_i \cdot p_i, \tag{3.29}$$

де c_i - число перевірочних процедур для визначення $f_{i-ої}$ несправності; p_i ймовірність виникнення $f_{i-ої}$ несправності ;$C_{сер}$, як правило, в декілька раз менше в порівняні з вхідною тест-програмою.

Висновки по розділу: 1. Для побудови тестів, що призначені для виявлення логічних несправностей елементів РЗА, доцільно використовувати метод виділення значущих шляхів у схемі на основі формування тимчасових D-кубів. Під тимчасовим D-кубом розуміють вектор розмірності n, кожна координата якого може приймати одне з п’яти можливих значень: 0,1, x, D, $\vec{D}$. Символом x позначають будь який стан. При розробці тестів припускають, що для кожного логічного елемента існують три типи наборів кубів: вироджені куби, D-куби та тупикові D-куби.

2. Використання D-кубів дає змогу створювати тести для виявлення константних несправностей у комбінаційних схемах. Стан схеми РЗА після подачі на її вхід тестової дії описується за допомогою логічного куба, де кожна координата куба відповідає певній лінії схеми. Основна ідея реалізації D-алгоритму полягає у забезпеченні поширення несправності від місця її виникнення до виходу схеми. Потім надають значення D ($\vec{D}$) лінії схеми на якій розглядаються несправності о або і, а потім здійснюється перетинання логічного куба з D кубами елементів. Відбувається зміна стану і ми отримуємо значення D ($\vec{D}$) на одному із входів схеми.Потім реалізується етап визначення даних, яких не визначає на вході на якому будується не суперечний вхідний набір,що реалізує умови напрацьовані під час D проходу.

Оптимізацію програми діагностування доцільно проводити шляхом вибору необхідного набору тестових дій і контрольних точок із заданої множини або визначення раціональної послідовності виконання діагностичних процедур.

Якщо відомі або можуть бути обчислені ймовірності відмов елементів на основі статистичних даних, критерієм для вибору порядку пошуку пошкодженого елемента може служити мінімізація середнього часу виявлення несправності, тобто врахування часу і ймовірності одночасно. При застосуванні цього підходу загальна кількість можливих причин несправностей поступово зменшується, доки не залишиться єдина конкретна причина. Якщо час перевірки кожного елемента однаковий, алгоритм виглядає так: спочатку всі елементи РЗА розташовують у ряд за спаданням ймовірності їх пошкодження, потім два останні елементи об'єднують в один і за значенням ймовірності вставляють назад у ряд. Процес повторюють, доки всі елементи не будуть об'єднані в один з відповідною ймовірністю $p_{\text{ч}} = 1$. Послідовність перевірок визначають в порядку зменшення $\boldsymbol{p}_{\text{ч}}$=1.

4. Найбільш ефективним способом діагностування РЗА є використання вмонтованих засобів. Вмонтовані засоби діагностики складаються з набору індикаторів відмов двох типів: пасивних та активних. Пасивні індикатори застосовуються для функціональної діагностики, тоді як активні — для тестового діагностування. Індикатори відмов представляють собою логічні пристрої, які підключені до низки входів і виходів РЗА і працюють за визначеною програмою аналізу сигналів у контрольних точках.

Індикатори відмов можуть бути як само-діагностуючимися, так і такими, що не мають цієї властивості. Активний індикатор відмов забезпечує сигналізацію про помилкові або надлишкові спрацювання та відмови, а також запобігає некоректному відключенню об'єкта.

Структура індикаторів відмов передбачає створення таблиці станів, визначення функції несправностей, формулювання умов індикатора, а також мінімізацію булевих функцій переходів (0 → 1) та (1 → 0), які відображаються у вигляді таблиць станів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі діагностування релейного захисту електричного обладнання. 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 чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (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, площина 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 приміщені, 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

неізольовані 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-проєктувальника 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 проєктних робіт наведено в таблиці 1.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату для постійних робочих місць

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Іа	22-28	55 при 28°С	0,1-0,2
Холодний	Іа	21-25	75 при 25°С	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/м3		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 освітленням, що створюється за допомогою світлодіоднихламп 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 еквівалент-ний 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		Природнє 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 середньогеометричними 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 вибухонебезпекою та пожежонебезпекою 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 огороджувальними 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 хвилинах) 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

Сту-пінь вог-не-стій-кості бу-дин-ків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходо-вих кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-несучі (пере-город-ки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 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 протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення 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: Проводено огляд та планування заходів щодо безпечної експлуатації об’єкта дослідження із врахуванням режимів його функціонування.

ВИСНОВКИ

У роботі розглядається вирішення науково-прикладної задачі вдосконалення методів і засобів оцінки технічного стану з метою підвищення надійності, безвідмовності та довговічності засобів релейного захисту і автоматики. Це досягається за рахунок удосконалення діагностичних моделей, розробки тестів і оптимізації програм діагностування.

За підсумками дослідження, проведеного в рамках бакалаврської кваліфікаційної роботи, отримано такі науково-практичні результати.

Аналіз поставлених питань дозволив сформулювати завдання підвищення безвідмовності та довговічності засобів РЗА під час їх експлуатації. Визначено необхідність забезпечення діагностичної підтримки експлуатаційних процесів РЗА. Таке забезпечення має здійснюватися шляхом розробки теоретичних основ методу діагностування та створення автоматизованого комплексу діагностичних засобів. Теоретично проблема розбивається на такі ключові завдання:

- аналіз методів та засобів перевірки технічного стану релейного захисту та автоматики;
- вдосконалення методів і засобів визначення технічного стану РЗА;
- побудова діагностичної моделі пристроїв релейного захисту та автоматики;
- синтез тестів для діагностування засобів релейного захисту та автоматики.
- оптимізація програми діагностування засобів релейного захисту та автоматики.
- економічний ефект від впровадження результатів дослідження.

2. Вдосконалено діагностичну модель (ДМ) визначення технічного стану логічної частини РЗА, вона має два етапи: побудову функціональної моделі та математичної. Побудова функціональної моделі вимагає дослідження режимів роботи РЗА, визначення особливостей перевірок, виділення функціональних елементів, дослідження характеру несправностей, збір і систематизацію даних про експлуатацію РЗА та інше.П ри побудові функціональної моделі, РЗА потрібно розглядати як систему, яка має зв’язок з зовнішнім середовищем за допомогою входів і виходів РЗА, враховувати

результати випробувань РЗА шляхом імітування основних режимів роботи об’єкта, що захищається, а також результати перевірки вимірювальних органів і логічної частини засобу перевірки, шляхом подачі комбінації вхідних сигналів.

3. Хибні спрацювання доцільно розглядати як несправність першого роду (0-1), при невизначеної несправності як несправність другого типу (1-0).Використовуючи таблицю станів, можна побудувати таблицю функцій несправностей, яка дає повний опис функціонування як справної так і несправної РЗА незалежно від її елементної бази.

4. Вдосконалено функціональну модель три ступеневого дистанційного захисту , показано, що в такому захисті можуть виникати кратні несправності одночасно групи функціональних елементів.

5. Робота справного РЗА, як і в попередньому випадку можна описати булевою функцією. Вважається, що доступними є виходи функціональних елементів, тобто задані контрольні точки і функціональна модель РЗА буде задана повністю. Якщо РЗА має елементи витримки часу, функціональну модель подають як сукупність функціонально зв’язаних елементів.

6. Показано, що структурну модель РЗА доцільно розглядати як логічну мережу, яка задається входом, виходом, логічними елементами, базисом і зв’язками між ними. Її доцільно будувати як булеву функцію в еквівалентній нормальній формі, яку отримують в результаті застосування до системи вихідних функцій елементів мережі і операцій внутрішньої суперпозиції. При цьому номера елементів потрібно зберігати в якості індексів змінних. Несправність може бути визначена за допомогою булевих похідних.

7. Запропоновано метод побудови тестів визначення логічних несправностей елементів РЗА, який здійснюється шляхом виділення суттєвих шляхів в схемі на основі побудови тимчасових D – кубів, під якими розуміють вектор розмірністю n, кожна координата має одне з п’яти значень: 0,1, x, D, $\vec{D}$. Си

8. Показано, що застосування D – кубів дозволяє будувати тести для перевірки константних несправностей в комбінаційних схемах. Стан в якому знаходиться схема РЗА після подачі на її вхід тестової дії , описують за допомогою логічного куба. Кожна координата куба відповідає певній лінії схеми. Реалізація D алгоритма полягає в забезпечені руху несправності від

місця виникнення на вихід схеми. Потім надають значення D ($\vec{D}$) лінії схеми на якій розглядаються несправності о або і, а потім здійснюється перетинання логічного куба з D кубами елементів. Відбувається зміна стану і ми отримуємо значення D ($\vec{D}$) на одному із входів схеми.Потім реалізується етап визначення даних, яких не визначає на вході на якому будується не суперечний вхідний набір,що реалізує умови напрацьовані під час D проходу.

9. Оптимізацію програми діагностування пропонується здійснювати шляхом добору найбільш доцільної комбінації тестових операцій і контрольних точок із наявного переліку, або ж через встановлення ефективної послідовності виконання спеціальних діагностичних процедур. Якщо відома ймовірність відмов окремих компонентів або її можна визначити за статистичними даними, то при формуванні послідовності пошуку несправного елемента можна використовувати критерій мінімального середнього часу виявлення несправності (тобто критерій "час – ймовірність"). Для зменшення загальних витрат на проведення діагностування доцільно застосовувати метод «гілок і меж», орієнтуючись на мінімальну середню вартість пошуку несправностей як головний критерій.

10. Найвища ефективність діагностики релейного захисту та автоматики (РЗА) досягається при використанні вбудованих діагностичних засобів. Такі засоби включають набір індикаторів відмов, які поділяються на пасивні та активні. Пасивні індикатори застосовуються для функціональної діагностики, тоді як активні – для тестування. Індикатори відмов є логічними пристроями, що з’єднані з певними вхідними і вихідними точками РЗА та працюють за визначеним алгоритмом аналізу сигналів у контрольованих точках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. Об’єднання енергетичних підприємств./Галузевий резервно –інвестицений фонд розвитку енергетики. К.,2003.-329с.

2.Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році .-Київ : Вид-во ТОВ «Девалто «, 2014.-251 с

3. Зорін Є. В. Забезпечення надійної роботи ОЕС України –нагальна потреба сучасності / Є.В. Зорін, С.в. Казанський, Д.О. Олефір //Електропанорама.-№4,7-8,-2007.

4. Казанський С.В.Забезпечення надійності електропостачання в умовах електроринку //Електропанорама, №9,-2009.

5. Казанський С.В. Моделі організацій ринків електричної енергії //Електропанорама -№3.-2008.

6. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник ../В.М.Кутін, М.О. Ілюхін,М.В. Кутіна-Вінниця:ВНТУ,2014-161 с.

7. Кідиба В. П., Релейний захист електричних систем: підручник / В. П. Кідиба – Львів: «Львівська політехніка», 2015. –533 с.

8. Кутін В.М. Засоби діагностування релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем: навчальний посібник /В.М.Кутін,М.В. Кутіна, М.О.Ілюхін.-Вінниця: ВНТУ,2017.-120с.

9. Кутін В. М. Релейний захист та системна автоматика: лабораторний практикум /В.М. Кутін. ,О. Є Рубаненко ., : Вінниця: ВНТУ, 2018. – 118 с.

10. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с. – Бібліогр,: с. 92 – 102.

11. Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного

керування та сигналізації електричних станцій та підстанцій від 0,4 до 750 кВ: СОУ-Н ЕЕ 35.514:2007 – Видання офіційне. – К. : ОЕП «ГРІФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2008. – 79 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

12. Перевозніков С.І. Аналіз методів декомпозиційного представлення цифрових пристроїв для систем внутрішньо схемного діагностування/ Перевозніков С.І., Біліченко Н.О., Озеранський В.С.// Вісник технологічного університету Поділля – 2004 - №2 – Частина 1, Том 1 – С 75 – 79.

13. Рубаненко О.Є. Програмно-логічні моделі мікропроцесорного пристрою захисту SPAC 801/О.Є.. Рубаненко ,В.О. Лесько, О.О. Рубаненко. Вінниця: ВНТУ, 2013. (лабораторний практикум) . – 132 с.

14. Кутін В. М. Вдосконалення методу контролю ізоляції блока «генератор–трансформатор» [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 1. – С. 39-45.

15. Кутін В. М. Оцінювання вірогідності контролю параметрів ізоляції обмотки статора блока «генератор–трансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. - №2 – С. 63-68. –ISSN 1997–9266.

16. Кутін В. М. Метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» [Текст] / В. М. Кутін, М. В. Кутіна, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницьког національного університету.

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

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

19. 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).

20. 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.).

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

22. 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://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv-.

23. 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

«_04_» ___03___ 20_25_ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську дипломну роботу

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

08-24.БДР.014.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф.

________Михайло КУТІН

«_04_» ___03___ 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-21б

________Дмитро ОСАДЧУК

«_04_» ___03___ 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Методи та засоби діагностики релейного захисту електрообладнання».

Скорочене найменування розробки – «Методи та засоби діагностики релейного захисту електрообладнання».

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 – підвищення рівня надійності, безвідмовності, довговічності засобів релейного захисту та автоматики шляхом вдосконалення діагностичних моделей, синтезу тестів, оптимізації програми діагностування.

4 Вимоги до розробки

В процесі експлуатації засобів РЗА важливо скоротити час, який витрачається на перевірку ТС, здешевити вартість обладнання за допомогою якого здійснюється перевірка, скоротити кількість обслуговуючого персоналу, мінімізувати витрати на пошук несправного елементу.

Це можна досягти шляхом застосування нової стратегії і засобів обслуговування РЗА. Основу її складає програмно-апаратурний ком експлуатаційного обслуговування (ПАК).

Розробка комплексу вимагає побудови математичної моделі пристроїв РЗА, визначення методів її аналізу та синтезу, оптимізації програми діагностування, принципів проектування апаратних рішень засобів діагностування РЗА.

5 Технічні характеристики

Впровадження методів і засобів діагностики в техніку РЗА вимагає рішення низки питань зв’язаних в першу чергу з підготовкою кваліфікованих спеціалістів і оснащення організацій, які проектують і виготовляють системи діагностування, сучасною мікропроцесорною технікою.

Актуальним залишається питання діагностичного забезпечення на етапі проектування мікроелектронної та мікропроцесорної техніки засобів РЗА.

Не вирішено ефективно питання організації перевірки РЗА по технічному стану. Саме тому існує необхідність провести теоретичні дослідження і розробку методів і алгоритмів прогнозування технічного стану з врахуванням результатів періодичного і неперервного діагностичного контролю засобів РЗА.

6. Матеріали,що подаються до захисту

Пояснювальня записка БДР, графічні та ілюстративні матеріали.

7 Джерела розробки

1. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник ../В.М.Кутін, М.О. Ілюхін,М.В. Кутіна-Вінниця:ВНТУ,2014-161 с.

2. Кідиба В. П., Релейний захист електричних систем: Підручник / В. П. Кідиба – Львів: «Львівська політехніка», 2015. –533 с.

3. Кутін В.М.Засоби діагностування релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем: навчальний посібник /В.М.Кутін,М.В. Кутіна, М.О.Ілюхін.-Вінниця: ВНТУ,2017.-120с.

4. Кутін В. М. Релейний захист та системна автоматика: лабораторний практикум /В.М. Кутін. ,О. Є Рубаненко ., : Вінниця: ВНТУ, 2018. – 118 с.

5. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. /

О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9Техніко-економічне обґрунтування

Визначити основні техніко економічні показники при впровадженні діагностичного комплексу контролю технічного стану РЗА: капітальні витрати на виготовлення та обслуговування засобів контролю технічного стану РЗА. 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.

Додаток Б

(обов’язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

<u>МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ</u>

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану засобів РЗА і автоматики.

Предмет дослідження – вдосконалення методів і засобів діагностики релейного захисту та автоматики.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є Покращення показників надійності, безвідмовної роботи та тривалого ресурсу пристроїв релейного захисту та автоматики забезпечується шляхом удосконалення методів діагностики, розробки ефективних тестових процедур і оптимізації діагностичних програм.

Поставлена мета потребує вирішення таких науково-технічних **задач:**

• Аналіз статичних і динамічних параметрів аварійних режимів у розподільних електричних мережах та оцінка ефективності існуючих методик і пристроїв для визначення місця пошкодження (ВМП);

•Теоретичне обґрунтування нового підходу до локалізації пошкоджень і розробка алгоритмічного забезпечення процесу ВМП в умовах неоднорідності розподільчих мереж;

•Удосконалення дистанційного методу визначення місця пошкодження в повітряних розподільчих мережах із урахуванням конструктивної, топологічної та режимної неоднорідності;

•Розробка принципової схеми системи вимірювання, призначеної для реалізації дистанційних способів локалізації пошкоджень;

•Оцінка ефективності реалізації процесу визначення місця пошкодження в реальних умовах експлуатації.

Загальна характеристика засобів РЗА (relay protection and automation)

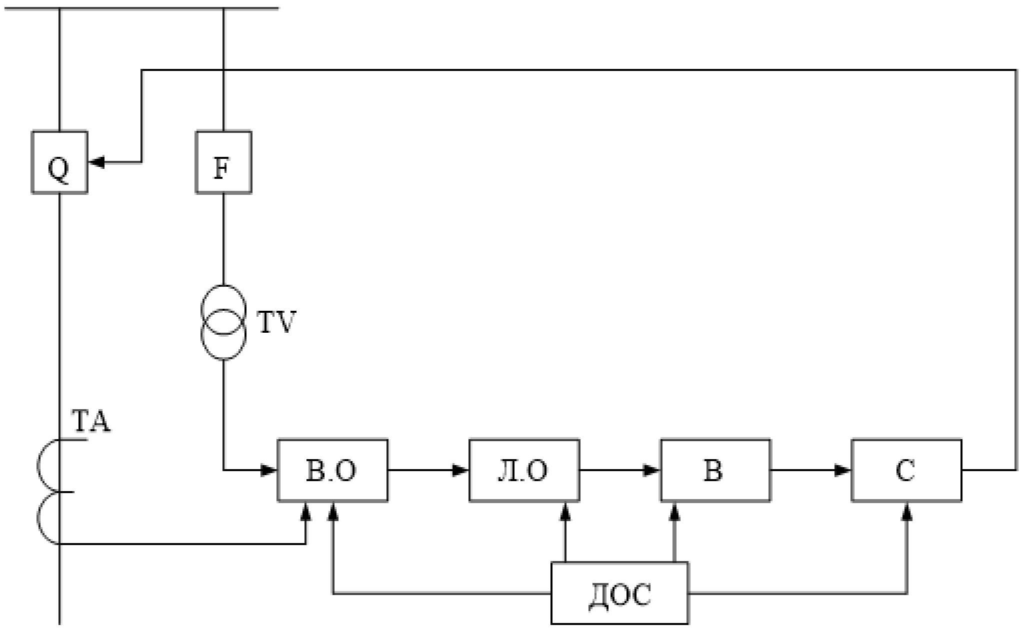


Рисунок 1 - Структурна схема релейного захисту: ВО – вимірювальний орган; Л.О. – Логічний орган; В – виконавчий орган; С – Сигнальний орган; ДОС – джерело оперативного струму

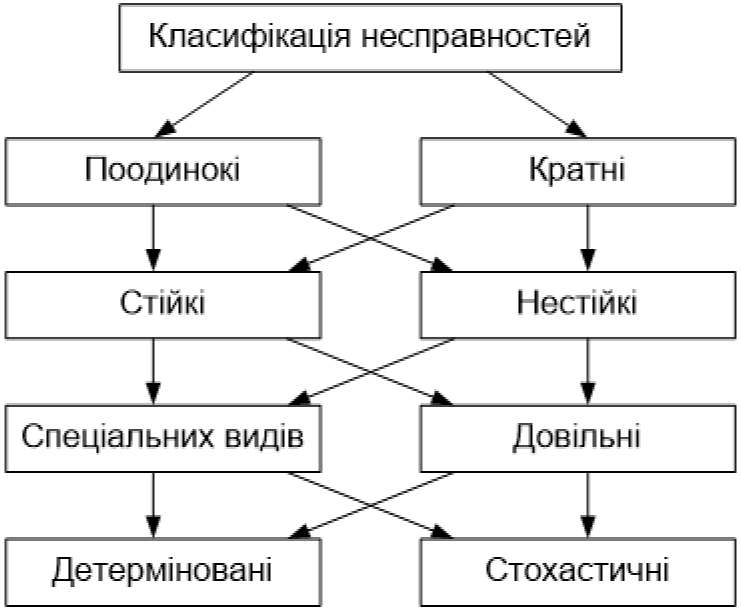


Рисунок 2 - Класифікація несправностей

Особливості побудови мікропроцесорного захисту

Рисунок 3 – Функціональна схема мікропроцесорного захисту

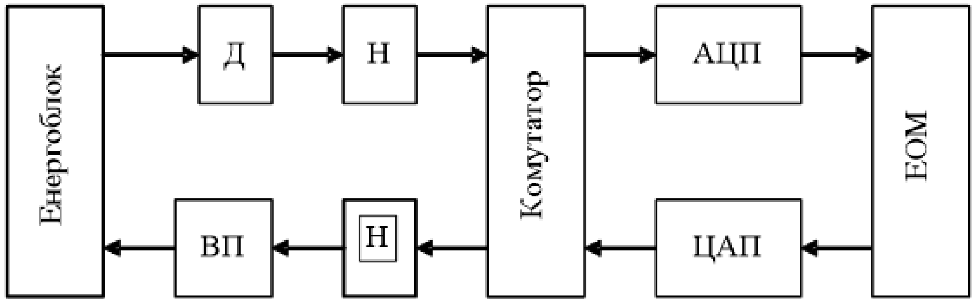


Рисунок 5 – Структурна схема діагностування енергоблока:

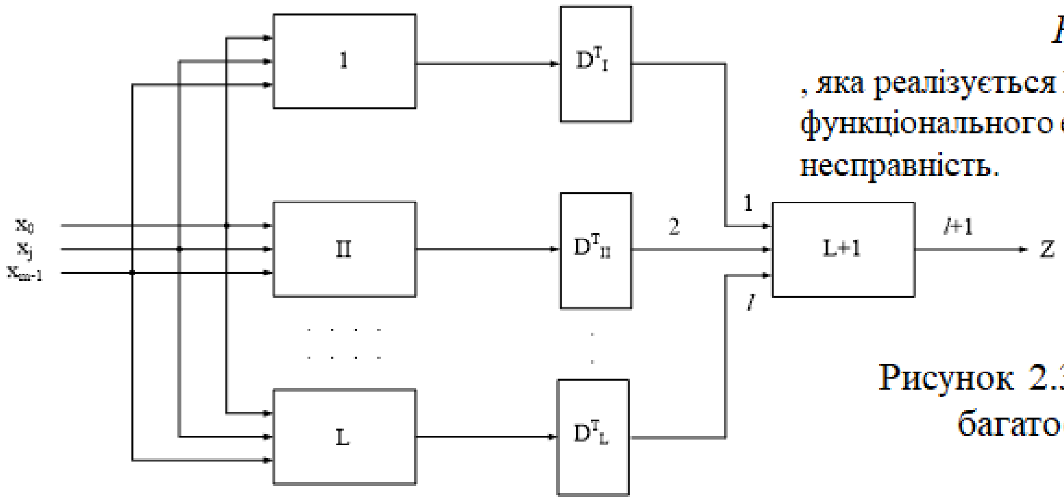
Д — давач; Н — нормалізатор; АЦП, ЦАП — аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі; ВП — виконавчий пристрій

Таблиця 2.1 – Стан справного пристрою РЗА

Вхідні дії		x_0	…	x_b	…	x_{m-1}	…	z_0	…	z_c	…	z_{n-1}
	x_0	x_{00}	…	x_{b0}	…	$x_{(m-1)0}$	…	R_{00}	…	0	…	$R_{(n-1)0}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
X_0^C	x_i	x_{0i}	…	x_{bi}	…	$x_{(m-1)i}$	…	R_{0i}	…	0	…	$R_{(n-1)i}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_h	x_{0h}	…	x_{bh}	…	$x_{(m-1)h}$	…	R_{0h}	…	0	…	$R_{(n-1)h}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_p	x_{0p}	…	x_{bp}	…	$x_{(m-1)p}$	…	R_{0p}	…	1	…	$R_{(n-1)p}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
X_1^C	x_g	x_{0g}	…	x_{bg}	…	$x_{(m-1)g}$	…	R_{0g}	…	1	…	$R_{(n-1)g}$
	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	x_u	x_{0u}	…	x_{bu}	…	$x_{(m-1)u}$	…	R_{0u}	…	1	…	$R_{(n-1)u}$

В таблиці 2.1 0,…i,…h – це відповідні номери діагностичних дій, при яких $z_c = 0$; p,…g,…u – номери діагностичних дій, при яких $z_c = 1$; $R_{00},\ldots R_{0u},\ldots R_{(n-1)u}$ - реакція РЗА на подачу діагностичних дій відповідно $H_0,\ldots H_u$, що фіксуються на виходах $z_0, z_{n-1}; R_c \in \{0,1\}$.

Особливості побудови діагностичної моделі багатоступінчастого захисту



Кожній несправності відповідає своя визначена функція

$$F_e^x(x_o, \ldots x_b, \ldots x_{m-1})$$

, яка реалізується РЗА, де e - тип несправності, к - номер функціонального елемента, у якому сталася несправність.

Рисунок 2.3 – Функціональна схема багатоступеневого захисту

Робота справної РЗА як і в попередньому випадку описується булевою функцією $F_0(x_0, x_b, \ldots x_{m-1})$. Вважається, що доступними для діагностування є виходи всіх функціональних елементів, тобто задано l+1 контрольних точок для яких справний пристрій реалізує функції $f_0(1), \ldots, f_0(l+1)$, а несправний - функції $f_e^{\hat{e}}(1), \ldots f_e^{\hat{e}}(l+1)$.

Отже, функціональна модель пристрою РЗА вважається повністю визначеною. Побудова математичної моделі враховує, що фіксація реакції, яка сигналізує про несправність типу (1-0) в блоці k (де k = I, II, ..., (L+1)), відбувається з урахуванням витримки часу tk.

Синтез тестів для діагностування засобів релейного захисту та автоматики

1. Алгоритмічний підхід до створення тестів, які забезпечують виявлення логічних дефектів у складових релейного захисту та автоматики

Цей метод базується на концепції виділення ключових маршрутів у схемі шляхом формування тимчасових D-кубів. Логічний куб представляє собою вектор розмірності n, де кожен елемент має одне з п'яти можливих значень: $0, 1, x, D, \overline{D}$, тут символом x позначають будь-який стан, а значення D і $\overline{D}$ розглянемо більш детально.

Кожному логічному елементу схеми відповідають три типи множин кубів, які застосовуються при створенні тестів: вироджені куби, D-куби та тупикові D-куби.

Використання D-кубів дає змогу створювати тести для виявлення постійних несправностей у комбінаційних схемах. Стан схеми після подачі тестового сигналу на її вхід описується логічним кубом $TF=(tf_1....tf_n)$. Координата i куба TF відповідає i-й лінії схеми. Суть D-алгоритму полягає у забезпеченні поширення несправності від точки її виникнення до виходу схеми. Спочатку визначається значення лінії, на якій знаходиться несправність ≡ 0, (≡ 1). після чого послідовно виконується операція перетину логічного куба TF із D-кубами елементів схеми. Цей процес завершується отриманням значення на одному із вхідних сигналів. Далі відбувається етап визначення відсутніх даних на вході, при якому формується несуперечливий набір вхідних сигналів, що відповідають умовам, встановленим під час D-проходу.

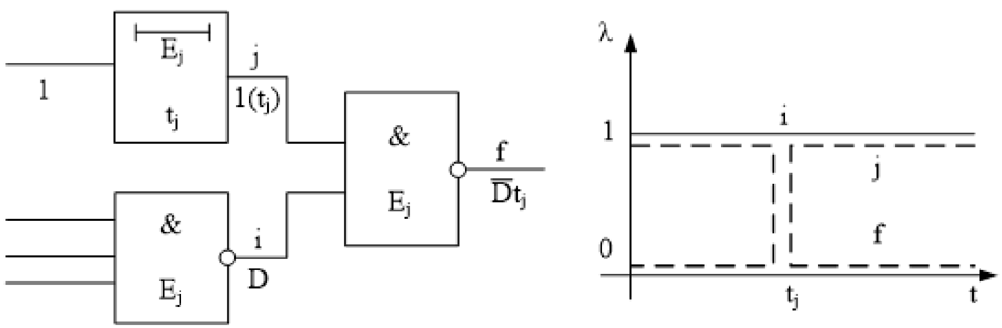


Рисунок 3.1 – Визначення часового D – шляху другого типу

Синтез вмонтованих засобів діагностування

Діагностику засобів релейного захисту та автоматики (РЗА) під час їхньої нормальної роботи найдоцільніше виконувати за допомогою вмонтованих локальних засобів. Такі вмонтовані засоби діагностування складаються з набору індикаторів відмов пасивного та активного типів. Пасивні індикатори використовуються для функціонального (робочого) діагностування, при якому не передбачена подача спеціальних тестових сигналів — аналіз проводиться на основі робочих сигналів.

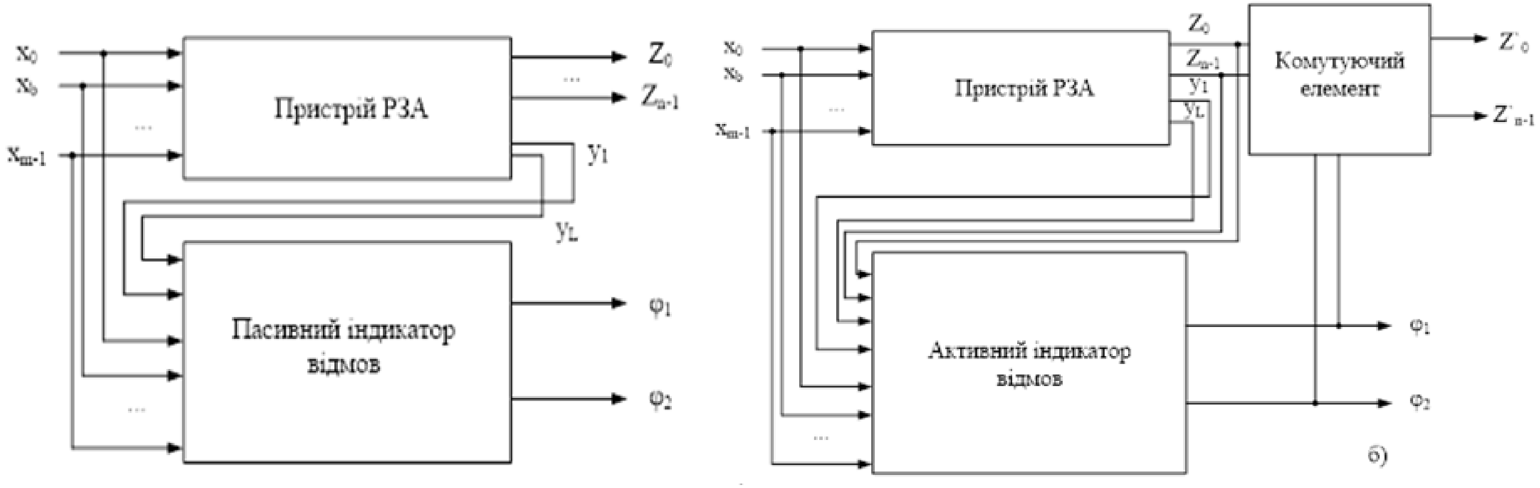


Рисунок 3.2 – Схема включення пристрою РЗА і індикатора відмов: пасивного (а) і активного (б)

Індикатор відмов — це логічний пристрій, який має зв’язок із низкою контрольних точок на входах, виходах (К) та в структурі РЗА і виконує аналіз сукупності сигналів згідно з заздалегідь визначеною програмою [14, 15, 16].

Індикатори відмов бувають двох типів: такі, що самодіагностуються, і такі, що не мають цієї здатності. Перші є більш складними і здатні сигналізувати про несправність як самого пристрою РЗА, так і його окремих елементів, що підвищує надійність експлуатації.

Синтез вмонтованих засобів діагностування

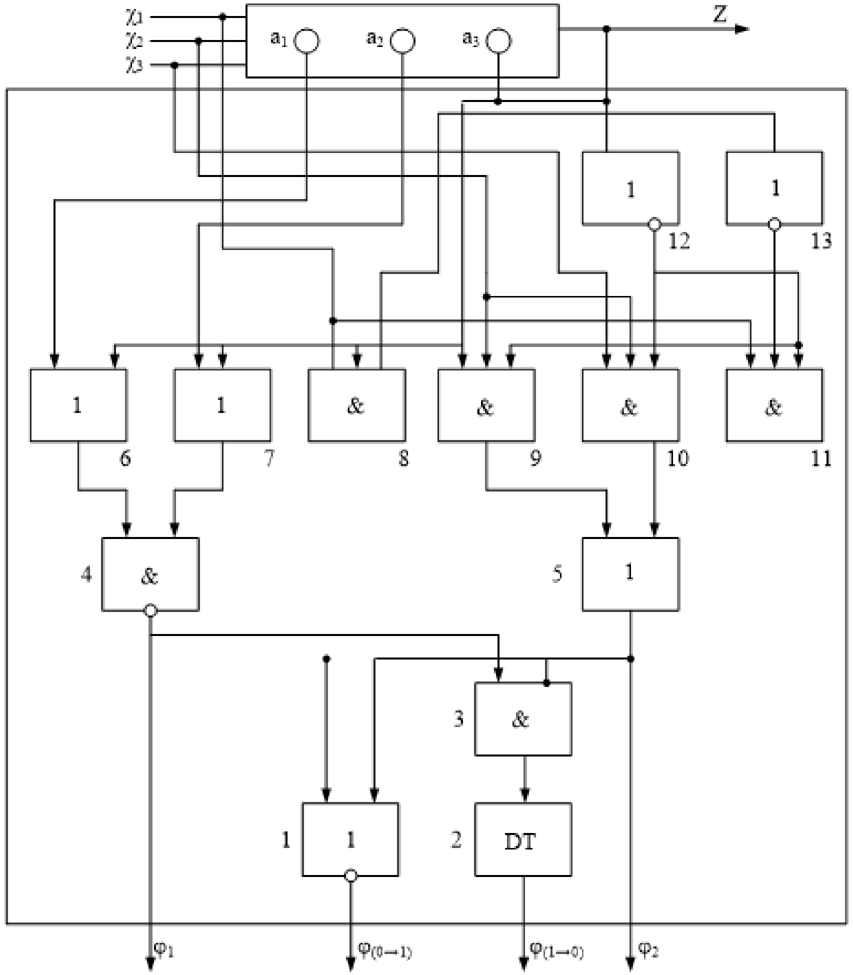


Рисунок 3.4 – Схема індикатора відмов, що діагностується пристрою РЗА

Таблиця 3.5– Таблиця станів пристрою РЗА і індикатора відмов.

	a_1	a_2		a_3	x_1	x_2	x_3	Z	φ_1	φ_1
A'XZ	0	0		0	0	0	0	0	1	0
	0	1		1	0	0	1	0	1	0
	1	0		0	0	1	0	0	1	0
	1	0		1	1	0	0	0	1	0
	0	0		1	0	1	1	1	0	1
	1	0		1	1	0	1	1	0	1
	1	0		0	1	1	0	1	0	1
	1	0		1	1	1	1	1	0	1
A''XZ	0	0		1	0	0	0	1	0	0
	0	0		1	0	0	1	1	0	0
	1	0		1	0	1	0	1	0	0
	0	0		1	1	0	0	1	0	0
	0	0		1	0	1	1	0	1	1
	1	0		0	1	0	1	0	1	1
	0	1		0	1	1	0	0	1	1
	0	1		0	1	1	1	0	1	1

Розглянемо альтернативний підхід до синтезу самодіагностованих індикаторів відмов. Припустимо, що умови роботи індикатора відмов задані у вигляді таблиці станів контрольних точок, а також входів і виходів пристрою РЗА (табл. 3.5), де робочими вважаються підмножини станів контрольних точок A' справного пристрою.

Приклад реалізації D - алгоритму

Розглянемо побудову D – алгоритму на прикладі дистанційного захисту ШДЭ-2801

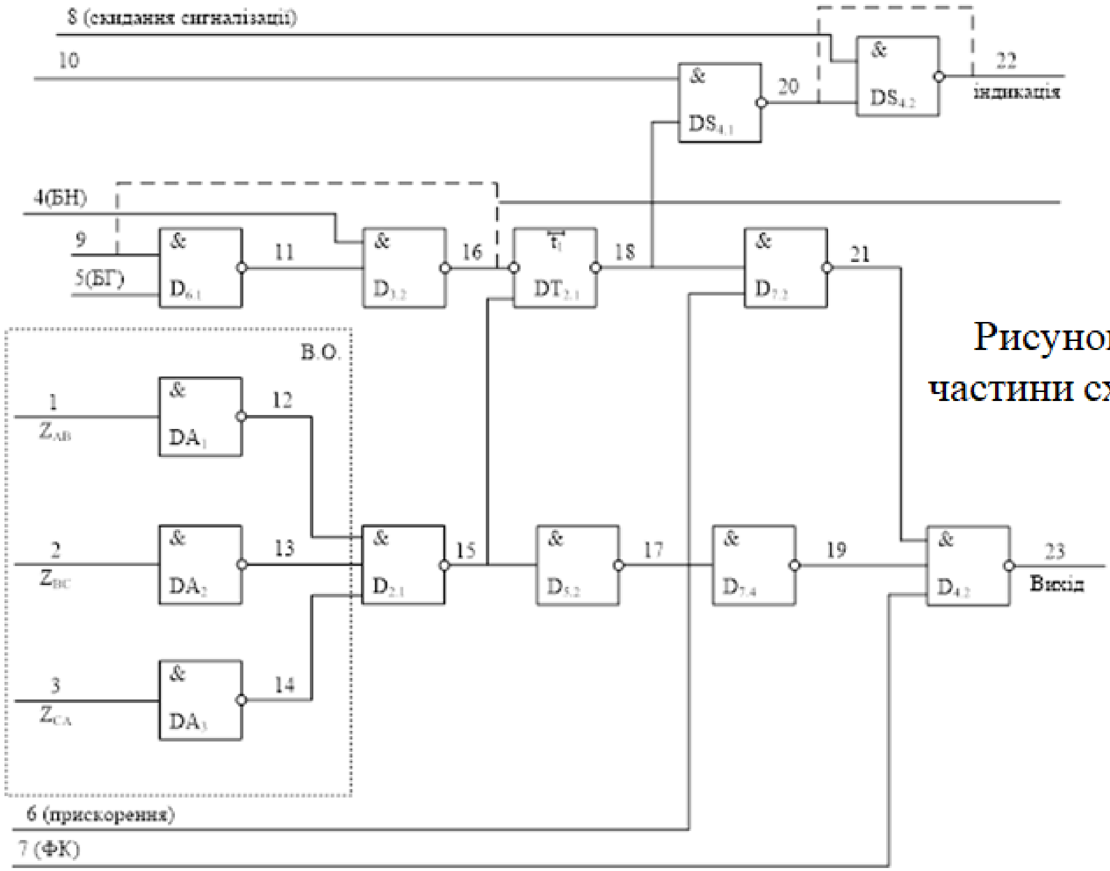


Рисунок 3.4 – Фрагмент логічної частини схеми дистанційного захисту

Виділимо частину схеми захисту, яка забезпечує проходження сигналу при виникненні короткого замикання у другій зоні дії (див. рисунок 3.4). Для створення тесту схема була перетворена на комбінаційну шляхом розриву зворотних зв’язків (елементи D6.1, D3.2 та тригер DS4).

Оптимізація програми діагностування

Мета оптимізації діагностування — мінімізувати витрати часу та матеріальних ресурсів на виявлення несправності.

Оптимізація може виконуватися двома шляхами:

- вибором мінімально необхідного набору тестових дій і контрольних точок з усієї множини;
- визначенням найбільш раціональної послідовності проведення діагностичних процедур.

Тестові дії на входи схеми								Типи несправностей на лініях схеми																		Сигнал на виході схеми	
1	2	3	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	22	23
0	0	0	1	0	1	1	1^*							0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	$D_{,}$	$D_{,}$
1	0	0	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0	1			0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}'$	$\overline{D}'$
0	1	0	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0		1		0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}'$	$\overline{D}'$
0	0	1	1	0	1	1	1^*	0	1			0	0			1	0	1		1	0	0	0	1	1	$\overline{D}'$	$\overline{D}'$
1	0	0	0	0	1	1	1^*	1		0								0	0			1	1	0	0	$\overline{D}'$	$D_{,}$
1	0	0	1	1	1	1	1^*		0				1					0		0		1	1	0	0	$\overline{D}_{,}$	$D_{,}$
1	0	0	0	1	0	1	1^*			1	0												0		1		$\overline{D}$
1	0	0	1	0	0	0	0				1	1												0	0	D	D

Критерієм вибору найкращої схеми пошуку несправностей є мінімізація середнього часу їх виявлення. Тобто, оптимальна схема забезпечує найменший середній час пошуку несправності в процесі діагностування

ВИСНОВКИ

За підсумками дослідження, проведеного в рамках бакалаврської кваліфікаційної роботи, отримано такі науково-практичні результати.

1. Аналіз поставлених питань дозволив сформулювати завдання підвищення безвідмовності та довговічності засобів РЗА під час їх експлуатації. Визначено необхідність забезпечення діагностичної підтримки експлуатаційних процесів РЗА.

2. Вдосконалено діагностичну модель (ДМ) визначення технічного стану логічної частини РЗА, вона має два етапи: побудову функціональної моделі та математичної. Побудова функціональної моделі вимагає дослідження режимів роботи РЗА, визначення особливостей перевірок, виділення функціональних елементів, дослідження характеру несправностей, збір і систематизацію даних про експлуатацію РЗА та інше.

3. Вдосконалено функціональну модель триступеневого дистанційного захисту , показано, що в такому захисті можуть виникати кратні несправності одночасно групи функціональних елементів.

4. Показано, що структурну модель РЗА доцільно розглядати як логічну мережу, яка задається входом, виходом, логічними елементами, базисом і зв'язками між ними. Її доцільно будувати як булеву функцію в еквівалентній нормальній формі, яку отримують в результаті застосування до системи вихідних функцій елементів мережі і операцій внутрішньої суперпозиції.

5. Запропоновано метод побудови тестів визначення логічних несправностей елементів РЗА, який здійснюється шляхом виділення суттєвих шляхів в схемі на основі побудови тимчасових D – кубів, під якими розуміють вектор розмірністю n, кожна координата має одне з п'яти значень: 0,1, x, D, $\overrightarrow{D}$.

6. Показано, що застосування D – кубів дозволяє будувати тести для перевірки константних несправностей в комбінаційних схемах. Стан в якому знаходиться схема РЗА після подачі на її вхід тестової дії , описують за допомогою логічного куба. Кожна координата куба відповідає певній лінії схеми. Реалізація D алгоритма полягає в забезпечені руху несправності від місця виникнення на вихід схеми.

7. Оптимізацію програми діагностування пропонується здійснювати шляхом добору найбільш доцільної комбінації тестових операцій і контрольних точок із наявного переліку, або ж через встановлення ефективної послідовності виконання спеціальних діагностичних процедур.

8. Найвища ефективність діагностики релейного захисту та автоматики (РЗА) досягається при використанні вбудованих діагностичних засобів. Такі засоби включають набір індикаторів відмов, які поділяються на пасивні та активні.

ПРОТОКОЛПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Методи та засоби діагностики релейного захисту електрообладнання

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-21б

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism **32,95** %

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) (підпис)

Гарант ОП Мошноріз М.М. ____________
(прізвище, ініціали, посада) (підпис)

Особа, відповідальна за перевірку ____________ Паянок О.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник ____________ Кутін В.М.
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач ____________ Осадчук Д.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

08-24.БДР.014.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата
Розробив:		Осадчук Д.А.		06.05
Перевірив		Кутін В.М.		06.05.25
Т. контр.				
Норм.кон.				03.06
Затверд.		Мошноріз М.М.		03.06

Методи та засоби діагностики релейного захисту електрообладнання

Літ.	Маса	Масштаб

Аркуш	Аркушів

ВНТУ, гр. ЕМСА-21б