

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Левицький Олег Іванович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка варіанту узагальненої моделі пристрою струмового захисту
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Левицький О. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Левицький О. І. Розробка варіанту узагальненої моделі пристрою струмового захисту

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Основною метою кваліфікаційної роботи є підвищення надійності і ефективності струмових захистів електрообладнання, експлуатованого на промислових підприємствах.

Ціль роботи полягає в підвищенні ефективності струмових захистів систем електропостачання шляхом глибокого аналізу принципів будови та застосування адаптації уставок спрацьовування.

Ключові слова: система електропостачання, струмовий захист, модель.

ABSTRACT

Levytskyi O. I. Development of a variant of a generalized model of a current protection device Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polessia National University, Zhytomyr, 2024.

The main purpose of the qualification work is to increase the reliability and efficiency of current protection of electrical equipment operated at industrial enterprises.

The aim of the work is to increase the efficiency of current protection of power supply systems through a deep analysis of the principles of the structure and the application of adaptation of the operation settings.

Keywords: power supply system, current protection, model.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУМОВОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	7
1.1 Принцип дії та селективність струмових захистів	7
1.2. Розрахунок уставок ступінчастих струмових захистів	9
Висновки по розділу 1	19
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ВИКОНАННЯ АДАПТИВНОГО МІКРОПРОЦЕСОРНОГО СТРУМОВОГО НАПРЯМЛЕНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ	21
2.1 Обґрунтування функціональної схеми адаптивної мікропроцесорного струмового спрямованого захисту лінії	21
2.2 Принципи виконання струмового захисту ліній з односторінним живленням від міжфазних коротких замикань	27
Висновки по розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЦИФРОВИХ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК У СИСТЕМІ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ MATLAB-SIMULINK	34
3.1 Загальний вигляд комп'ютерного випробувального комплексу	35
3.2 Комп'ютерний програмний комплекс із жорсткою структурою узагальненого електроенергетичного об'єкта для дослідження працездатності струмових цифрових захист ліній електропередачі	37
3.3 Комп'ютерний випробувальний комплекс з гнучкою структурою узагальненого електроенергетичного об'єкта на дослідження працездатності струмових цифрових захист ліній електропередачі	39
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ВСТУП

Системи енергопостачання промислових підприємств, як і будь-які енергосистеми, схильні до пошкоджень і ненормальних режимів роботи. Пошкодження елементів енергосистем супроводжуються появою значних аварійних струмів і викликають суттєве зниження напруги у електромережах. Аварійні струми виділяють велику кількість тепла, яке стає причиною руйнування в місцях пошкодження, і небезпечно нагрівають проводи непошкоджених ліній електропередач та обладнання, яким проходить струм ушкодження [2]. Зниження напруги призводить до навантаженням елементів енергосистеми і порушення стабільною роботи споживачів електроенергії.

Для забезпечення безпеки експлуатації електричних мереж і електрообладнання в промисловості широко застосовуються пристрої струмового захисту – апарати захисту від струмів витоку та пристрої релейного захисту. У процесі експлуатації систем електропостачання промислових виникають ситуації, що призводять до неселективних спрацьовувань захистів. Зниження напруги мережі призводить до неспрацьовування пристроїв захисту, при аварійних режимах роботи захищається приєднання, а підвищення напруги мережі - до неселективних відключень, при аварійних режимах незахищених приєднань. Неконтрольовані зміни параметрів мереж, що захищаються наводять до зниження ефективності засобів захисту.

У зв'язку з викладеним, виникає необхідність розробки адаптивних алгоритмів роботи пристроїв струмових захистів, що забезпечують їх інтелектуальне налаштування при зміні параметрів мережі з обліком вимог до узгодженню цих пристроїв.

Застосування адаптивних пристроїв струмових захистів на сьогодні отримало широкого поширення, однак такі пристрої можуть значно підвищити надійність роботи систем електропостачання загалом. Такі адаптивні системи полегшать експлуатацію складних пристроїв захисту, спростять процес розрахунку уставок спрацьовування, а головне допоможуть

вирішити завдання підвищення потужності і надійність енергосистем.

Названі фактори та проблеми свідчать про актуальність завдань, які вирішуються в кваліфікаційній роботі, а розробка адаптивної системи струмових захистів дозволить значно підняти надійність і безпеку роботи систем електропостачання підприємств.

Метою роботи є підвищення надійності і ефективності струмових захистів електрообладнання, експлуатованого на промислових підприємствах.

Відповідно до цієї метою в рамках кваліфікаційної роботи поставлено та **вирішено наступні завдання:**

- визначити загальну характеристику струмового релейного захисту та особливості розрахунку уставок ступінчатих струмових захистів;
- визначити принципи виконання струмового захисту ліній з односторінним живленням від міжфазних коротких замикань
- сформулювати вимоги та принципи будови програмно-інформаційного забезпечення комплексів для функціональних випробувань цифрових струмових захистів електроустановок у системі динамічного моделювання MATLAB-SIMULINKю

Ціль роботи полягає в підвищенні ефективності струмових захистів систем електропостачання шляхом глибокого аналізу принципів будови та застосування адаптації уставок спрацьовування.

Методи дослідження . Для вирішення поставлених завдань, поставлених у роботі, використовувалися фундаментальні положення теоретичних основ релейний захисту, фундаментальні положення теоретичних основ електричних машин та основ електротехніки, імітаційне моделювання та метод лабораторного експерименту. Математичне і імітаційне моделювання, а також обчислення параметрів моделей, розрахунки та обробка результатів виконано в графічній середовищі імітаційного моделювання MATLAB/SIMULINK і SimPowerSystems.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Гончаренко Ю. П., Левицький О. І. МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЇВ

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТУ В ГРАФІЧНОЇМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK

Біоенергетичні системи: Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 31-33 с.

Гончаренко Ю. П., Левицький О. І. МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ІЗОЛОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 123-125.

Левицький О.І. АДАПТИВНИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 105-107.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУМОВОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

1.1 Принцип дії та селективність струмових захистів

Струмові релейні захисту набувають дії при збільшенні струму у фазах (наприклад, лінії) понад певне значення. В якості елементів, які реагують на зростання струму, використовуються максимальні струмові реле.

Струмові релейні захисту поділяються на максимальні струмові (МСЗ) та струмові відсічення (СВ). Основна відмінність між ними полягає у способі забезпечення селективності. Селективність дії МСЗ досягається за допомогою витримки часу, а СВ відповідним вибором струму спрацьовування.

Максимальні струмові захисти є основними захистами для мереж із одностороннім живленням. Їх встановлюють на початку кожної лінії з боку джерела живлення.

У радіальній мережі з одностороннім живленням захист встановлюється на кожній лінії. При цьому захист найбільш віддаленої від джерела живлення лінії має найменший струм спрацьовування та найменшу витримку часу. Захист кожної наступної лінії має витримку часу більшу, ніж у попереднього захисту.

При короткому замиканні (КЗ), наприклад, у точці К1 (рис. 1.1, а), струм КЗ проходить по всіх ділянках мережі, розташованих між джерелом живлення G і місцем ушкодження, внаслідок чого приходять у дію всі захисти 1 - 4. Однак за умовою селективності спрацювати на відключення повинен лише захист 4, встановлений на пошкодженій лінії. Для забезпечення зазначеної селективності максимальні захисту виконуються з витримками часу, які нарастають від споживача до джерела живлення, як це показано на рис. 1.1 б. При дотриманні цього принципу у разі КЗ у точці К1 мережі раніше за інших спрацює захист 4 і здійснить відключення пошкодженої лінії. Захисти 1,2 і 3 повернуться в початкове положення, не встигнувши вплинути на вимкнення.

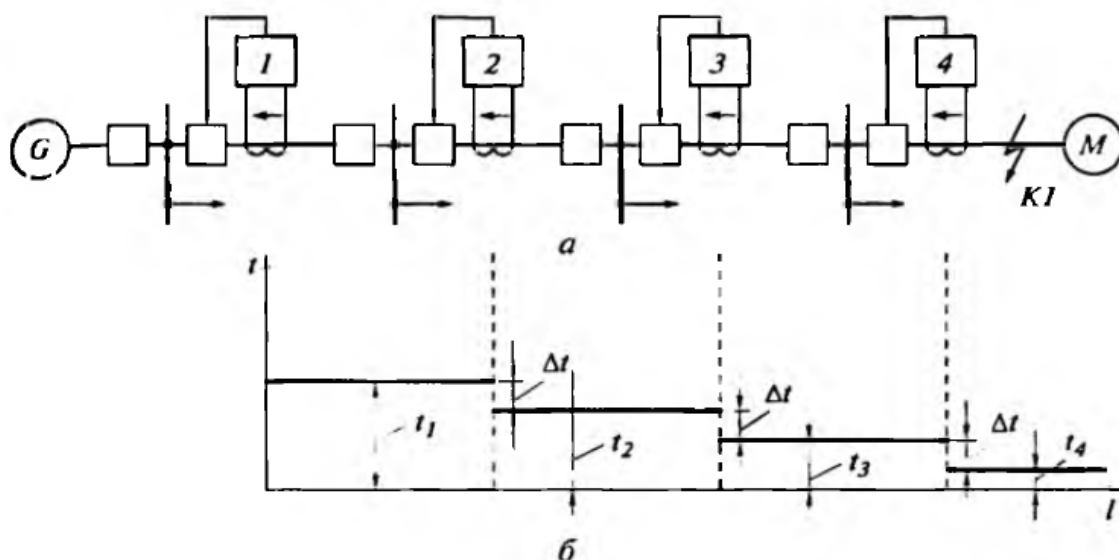


Рисунок 1.1. Максимальні струмові захисти в радіальній мережі з одностороннім живленням: а - розміщення захистів 1 - 4 ; б - витримки часу захистів, які вибрані по ступінчастому принципу

Розглянутий принцип витримок часу називається східчастим. Максимальні струмові захисти виконуються за три- та двофазними схемами. За способом живлення оперативних кіл МСЗ непрямой дії поділяються на МСЗ на постійному та змінному оперативному струму. За характером залежності часу дії від струму розрізняють МСЗ із залежною та незалежною характеристиками.

Параметрами спрацьовування МСЗ є струм $I_{сз}$ та час $t_{сз}$ спрацьовування захисту.

МТЗ повинна надійно працювати при пошкодженнях на захищувальній ділянці, але в той же час вона не повинна діяти при максимальному робочому струмі навантаження $I_{нmax}$ та короточасних перевантаженнях, викликаних пуском та самозапуском електродвигунів. Сумарний струм під час самозапуску може перевершувати сумарний максимальний робочий струм навантаження режиму $I_{рmax}$.

Збільшення струму навантаження через самозапуск електродвигунів

оцінюють коефіцієнтом самозапуску $k_{cзп}$, що показує, скільки разів зростає струм $I_{p\max}$.

Для відбудови МСЗ по струму $I_{p\max}$ необхідно виконати дві умови[1]:

$$1) I_{нов} \geq k_{від} \cdot I_{н\max} = k_{від} \cdot k_{cзп} \cdot I_{p\max},$$

де $I_{нов}$ – струм повернення МСЗ (реле максимального струму); $k_{від}$ - коефіцієнт відбудови;

$$2) I_{сз} > I_{н\max}.$$

Найбільше значення $I_{н\max}$ має зазвичай у наступних післяаварійних режимах:

- при відключенні однієї з паралельних ліній (навантаження на тій що залишилася подвоюється);
- при успішному включенні (під дією АПВ або вручну) лінії, що відключалася через пошкодження з підключеного до неї навантаженням;
- при підключенні до лінії, що знаходиться в роботі, під дією АВР додаткового навантаження. При включенні секційного вимикача пристроєм АВР необхідно враховувати накидання потужності на першу лінію при відключенні лінії, і навпаки.

1.2. Розрахунок уставок ступінчастих струмових захистів

Розрахунок рекомендується починати з найбільш чутливої щаблі, т.б. МСЗ. Струм спрацьовування МСЗ вибирають в амперах (первинних) за трьома умовами:

- неспрацьовування захисту 2РЗ при надструмах післяаварійних навантажень, так як після відключення короткого замикання на попередньому елементі (рис. 1.2);
- узгодження чутливості захисту наступного та попереднього елементів (Л2 та Л1 на рис. 1.2);
- забезпечення достатньої чутливості при КЗ в кінці елемента, що захищається (основна зона) і в кінці кожного з попередніх елементів (зони

далекого резервування).

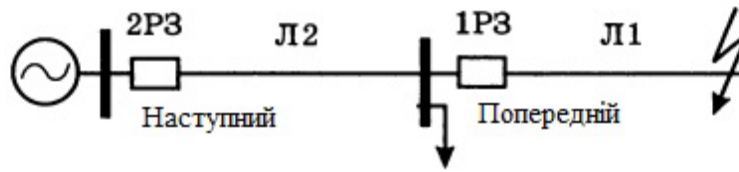


Рисунок 1.2. Розрахункова схема для вибору уставок релейного захисту (РЗ)

Попередній елемент можна називати нижчестоящим (downstream), а наступний – вищестоящим (Upstream).

За першою з цих умов струм спрацьовування МСЗ на Л2 вибирають за виразом [1]:

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_{сзп}}{k_{пов}} \cdot I_{р \max}, \quad (1.1)$$

де k_n - коефіцієнт надійності неспрацьовування захисту; $k_{пов}$ - коефіцієнт повернення максимальних реле струму; $k_{сзп}$ - коефіцієнт самозапуску навантаження, який відображає збільшення робочого струму $I_{р \max}$ за рахунок одночасного пуску всіх тих електродвигунів, які загальмувалися при зниженні напруги під час короткого замикання.

За відсутності у складі навантаження електродвигунів напругами 6 і 10 кВ та за часу спрацьовування МСЗ більше 0,3 с можна приймати значення $k_{сзп} \geq 1,1 - 1,3$.

Максимальні значення коефіцієнта самозапуску при значній частці електродвигунового (моторного) навантаження визначаються розрахунком для конкретних умов, але обов'язково при найбільш важкій умові пуску повністю загальмованих електродвигунів.

Максимальне значення робочого струму елемента $I_{р \max}$ визначається з урахуванням його максимально допустимого навантаження. Наприклад, для трансформаторів 10 та 6 кВ потужністю до 630 кВ-А допускається тривале навантаження до 1,6-1,8 номінального струму, для трансформаторів

двотрансформаторних підстанцій 110 кВ - до 1,4-1,6 номінального струму. Для деяких елементів перевантаження взагалі не допускається (кабелі напругою вище 10 кВ, реактори). Значення допустимих максимальних навантажень визначають диспетчерські служби.

За умовою узгодження чутливості захисту наступного (захищеного) та попередніх елементів струму спрацьовування наступного захисту вибирають за виразом [3]

$$I_{c.з.наст} \geq \frac{k_{н.у.}}{k_p} \left[\sum_1^n I_{c.з.наст \max(n)} + \sum_1^{N-n} I_{роб \max(N-n)} \right], \quad (1.2)$$

де $k_{н.с}$ - коефіцієнт надійності узгодження, значення якого залежать від типу струмових реле та приймаються в межах від 1,1 за погодженням захисту з реле типу РТ-40, РСТ, SPAC т.п. до 1,3-1,4 при узгодженні захисту від реле прямого впливу типу РТВ; k_p - коефіцієнт струморозподілу, який враховується лише за наявності кількох джерел живлення, а за одного джерела живлення дорівнює 1; $\sum_1^n I_{c.з.наст \max(n)}$ - найбільша з геометричних сум струмів спрацьовування максимальних струмових захистів паралельно працюючих попередніх елементів n (рис. 1.3); при різниці між кутами фазового зсуву напруги та струму для всіх попередніх елементів n не більше 50° допустимо арифметичне додавання замість геометричного; $\sum_1^{N-n} I_{роб \max(N-n)}$ - геометрична сума максимальних значень робочих струмів усіх попередніх елементів N , за винятком тих, із захистами яких провадиться узгодження n ; при приблизно однорідному навантаженні допустимо арифметичне додавання замість геометричного, що створює певний розрахунковий запас.

Наприклад, для кожної з попередніх ліній 2-7 (Рис. 1.3) значення робочого струму $I_{роб \max} = 100$ А; струм спрацьовування захисту 5-7 ліній, що працюють паралельно ($n = 3$), однаковий: $I_{с.з} = 300$ А. Тоді струм спрацьовування максимального струмового захисту наступної лінії 1 за умовою (1.2) при $k_{н.у.} = 1,1$.

$$I_{c.z.1} \geq 1,1 \cdot (3 \cdot 300 + 3 \cdot 100) \geq 1320 \text{ A}$$

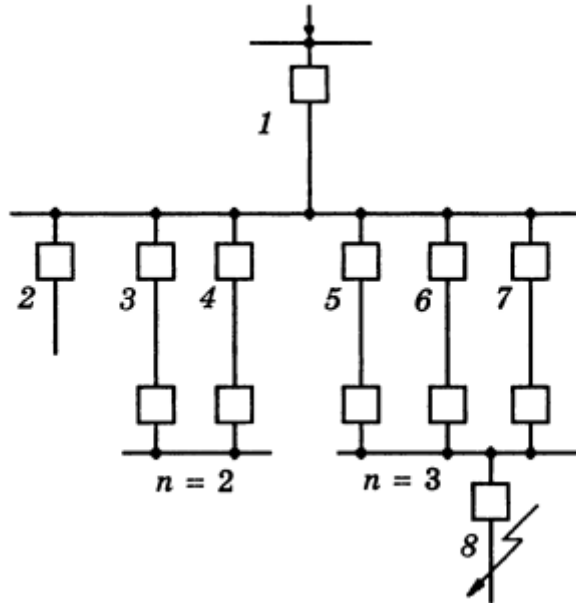


Рисунок 1.3. Схема електричної мережі з паралельно працюючими попередніми елементами 3, 4 і 5-7, пояснювальна умова (2.2) погодження чутливості максимальних струмових захистів наступних та попередніх елементів

Встановивши такий струм спрацьовування захисту наступної лінії 1, можна бути впевненим у тому, що її вимірювальні органи спрацюють лише за таких значення струму КЗ, при яких забезпечується спрацювання захистів попередніх елементів. При цьому враховується можливість розподілу струму КЗ за двома або трьома паралельно працюючим попереднім лініям чи трансформаторам. Паралельна робота більш ніж трьох елементів здійснюється дуже рідко.

Правила влаштування електроустановок в Україні вимагають виконувати узгодження чутливості захисту у всіх випадках, коли можлива дія захисту наступного елемента (лінія 1 на рис. 1.3) через відмови внаслідок недостатньої чутливості захисту попереднього елемента. Слід зазначити, що у розподільчих мережах, де в основному і застосовуються максимальні струмові захисту, дуже ймовірні відмови захисту через недостатню

чутливість при КЗ у зонах далекого резервування.

Наприклад, при віддалених КЗ на лініях при відмові власного захисту або вимикача (лінія 8 на рис. 1.3) або ж за цих же умов при КЗ в трансформаторах, в електродвигунах, за реакторами тому подібно, коли значення струмів КЗ невеликі та близькі до струмів спрацювання захистів наступних елементів (ліній 5-7 на рис. 1.3), захисту цих елементів знаходяться на межі спрацьовування та можуть відмовити. У це же час за наступним елементом 1 проходить сумарний струм, і його захист може спрацювати неселективно.

Найбільш важкими умови узгодження чутливості максимальних струмових захистів виявляються при паралельно працюючих попередніх елементах, при різнотипних часточних характеристиках узгоджуваних захистів (у тому числі і плавких запобіжників), а також при встановленні на попередніх елементах дистанційного захисту.

З отриманих за виразами (1.1) та (1.2) значень струмів спрацювання захисту вибирають найбільшим, а потім визначають струм спрацювання реле (уставка по струму) [4]:

$$I_{c.p} = \frac{I_{c.z} \cdot k_{cx}^{(3)}}{n_T}, \quad (1.3)$$

де $I_{c.z}$ - струм спрацювання захисту, А (первиний);

$k_{cx}^{(3)}$ - коефіцієнт схеми, що показує в скільки разів струм у реле більше, ніж струм у вторинній обмотці трансформатора струму при нормальному симетричному режимі роботи елемента, що захищається; при схемах включення вимірювальних реле на фазні струми (повна та неповна «зірка») значення цього коефіцієнта дорівнює 1, а для схем, де вимірювальні реле включені на різницю фазних струмів (наприклад, "трикутник"), дорівнює 1,73; n_T – коефіцієнт трансформації трансформаторів струму.

Струм спрацювання $I_{c.p}$ встановлюється на реле та тому часто називається уставкою. Цифрові реле мають плавне регулювання струмів спрацювання (уставок). Багато електромеханічних реле мають ступінчасте

регулювання струму спрацьовування (РТВ, РТ-80).

Оцінка ефективності захисту проводиться за допомогою коефіцієнта чутливості $k_{\text{чут}}$, який показує, наскільки струм у реле захисту при різних видах КЗ перевищує струм спрацьовування $I_{\text{с.р}}$ (уставку) [4]:

$$k_{\text{чут}} = \frac{I_{\text{р min}}}{I_{\text{с.р}}}, \quad (1.4)$$

де $I_{\text{р min}}$ - мінімальне значення струму в реле при найменш сприятливих умов, А.

При визначенні значення цього струму необхідно враховувати вид та місце КЗ, схему включення вимірювальних органів (реле) захисту, а також реально можливі мінімальні режими роботи живильної енергосистеми, за яких струми КЗ мають найменші значення.

Мінімальні значення коефіцієнта чутливості захисту повинні бути не менше, ніж потрібно Правилами. Наприклад, для максимального струмового захисту вони повинні бути не менше 1,5 при КЗ в основній зоні захисту та близько 1,2 при КЗ у зонах далекого резервування, тобто на попередніх (нижчих) елементах.

Для вибору мінімального значення струму в реле розглядаються всі види КЗ. Наприклад для двофазної схеми максимального струмового захисту (2I>) при КЗ на лініях, що захищаються, мінімальне значення струму в реле слід розраховувати при двофазних КЗ. При тих же видах КЗ за трансформаторами зі схемами з'єднання обмоток Y/A-11 або A/Y важливо врахувати схему захисту: для дворелейної схеми (2I>) розрахункове значення $I_{\text{р min}} = 0,5I_{2\text{к}}^{(3)}$, а для трирелейної (3I>) $I_{\text{р min}} = I_{2\text{к}}^{(3)}$ отже, чутливість захисту підвищується в 2 рази та виходить однаковою при трифазному та всіх видах двофазних КЗ. Слід зазначити, що чутливість захисту оцінюється за найбільшим із вторинних струмів, що проходять у вимірювальних реле захисту, хоча б і в одному з трьох реле, оскільки все реле самостійно діють на логічну частину захисту. Цифрові реле можна підібрати з модулями МТЗ 2I> або 3I> залежно

від вимог чутливості при КЗ за трансформаторами.

Для струмових захист ліній напругою 6-110 кВ із включенням струмових реле на фазні струми (схеми повної і неповної зірки) розрахунок коефіцієнта чутливості може проводитися за первинними значенням струмів КЗ та спрацьовування захисту [4]:

$$k_{\text{чут}} = \frac{I_{\text{к min}}}{I_{\text{с.р}}}, \quad (1.5)$$

Для оцінки чутливості струмових захистів силових трансформаторів краще користуватися виразом (1.4).

Збільшення чутливості МТЗ може бути досягнуто кількома способами, у тому числі:

зменшенням струму спрацьовування, обраного за умовам (1.1) та (1.2), шляхом використання нових цифрових реле зі значеннями $k_{\text{в}} = 0,96$ і $k_{\text{н}} = 1,1$, а також шляхом зниження струму самозапуску з допомогою попереднього відключення частини електродвигунів;

збільшенням струму $I_{\text{к min}}$ шляхом зменшення довжини основної зони, що захищається, за допомогою установки автоматичних секційних вимикачів з МТЗ;

допущенням неселективних спрацьовувань МТЗ ліній при малих значеннях струму при малоймовірних КЗ всередині трансформаторів, підключених до цієї лінії через плавкі запобіжники типу ПКТ напругою 6 або 10 кВ.

Витримка часу максимальних струмових захистів вводиться для уповільнення дії захисту з метою забезпечення селективності дії захисту наступного елемента щодо захисту попередніх елементів. Для цього витримка часу (або час спрацьовування) захисту наступної лінії Л2 (див. рис. 1.2) вибирають більшу, ніж у захистів попередніх елементів, наприклад, лінії Л1[3]:

$$t_{\text{с.з.наст}} = t_{\text{с.з.попер}} + \Delta t. \quad (1.6)$$

При цьому забезпечується селективне (виборче) відключення насамперед найближчого до місцю КЗ вимикача. Тим самим запобігаються додаткові зайві відключення неушкоджених елементів.

Величина Δt - ступінь селективності, або ступінь часу (time interval). Його значення вибирають у залежності від точності роботи захисних пристроїв та часу вимкнення вимикачів.

Значення Δt для захисту з незалежною характеристикою визначається головним чином точністю роботи реле часу. Точність роботи сучасних електромеханічних реле часу з вартовим механізмом серій ЕВ та РВ знижується зі збільшенням діапазону уставок за шкалою. Тому не слід за значення $t_{cз}$, що становлять менше 3,5 с, застосовувати реле зі збільшеним діапазоном вимірювань (9 і особливо 20 с). У практичних розрахунках для захисту суміжних елементів з використанням реле РВ, ЕВ-110 та ЕВ-120 (межі вимірювань 1,3 та 3,5 с) приймається середнє значення $\Delta t = 0,4$ с. Якщо попередній захист виконана без реле часу (струмова відсікання), то допустимо за необхідності приймати $\Delta t = 0,3$ с. Якщо попередній захист виконано з реле часу РВ або ЕВ-120, а наступна - з реле ЕВ або РВ-130 (межа вимірів 9 с), то $\Delta t = 0,5$ с. При виконанні обох узгоджуваних захистів з реле ЕВ або РВ-130 ступінь $\Delta t = 0,6$ с. У поодиноких випадках установки в подальшому захисті реле ЕВ або РВ-140 (межа вимірювань 20 с) рекомендується значно більший ступінь: $\Delta t = 2$ с. Для захисту з реле типу РВМ-12 та РВМ-13 $\Delta t = 0,5 + 0,6$ с.

Ступінь селективності Δt повинна забезпечуватися:

а) за погодженням захисту із залежними характеристиками - при максимальному значенні струму КЗ в початку попередньої ділянки; таке узгодження дозволяє у деяких випадках прискорювати відключення КЗ ;

б) за погодженням захисту з незалежною і залежною характеристиками - при струмі спрацювання подальшого захисту із незалежною характеристикою.

Зменшення часу дії наступних захистів може бути досягнуто шляхом збільшення їх струму спрацьовування, якщо це не суперечить вимогам чутливості.

Недоліком максимальних струмових захистів є «нагромадження» витримок часу, особливо суттєве для головних елементів у багатоступінчастих електричних мереж. Для подолання цього недоліку використовуються цифрові пристрої захисту, що дозволяють приймати щаблі селективності $\Delta t = 0,2-5-0,3$ с (за умови, що на всіх суміжних лініях використовуються подібні реле з незалежними часострумовими характеристиками та однотипні вимикачі).

Іншим способом прискорення відключення КЗ є використання двох- і особливо триступневих цифрових захистів. У ряді випадків суттєве зниження часу відключення КЗ досягається шляхом використання струмових захистів із зворотнозалежними від струму частотними характеристиками. При тому самому значенні струму КЗ, що проходить через два суміжні захисти з різними струмами спрацьовування, ці захисти мають різний час спрацювання через різні кратності струму в їх вимірювальних органах .

Наприклад, на рис. 1.4 показано мережу з трьома послідовно включеними лініями та захистами 1, 3, 5. У кожного з цих захистів вибирають різні значення струмів спрацьовування $I_{сз}$ за умовами (1.1), (1.2) та відповідно порізному розташовуються на карті селективності їх час струмові характеристики 1, 3, 5 (рис. 1.4). У міру наближення умовної точки КЗ до джерела живлення значення струмів КЗ зростають, але відношення $I_K/I_{сз}$ може залишатися незмінним, як та час спрацювання реле, який автоматично обчислюється за цим відношенням (кратності струму КЗ).

Як видно із рис. 1.4, це досягається вибором різних значень струмів спрацьовування захисту сусідніх елементів: у захисту 3 більшого значення, ніж у захисту 1, а у захисту 5 - більшого, ніж у захисту 3. При наближенні точки КЗ до джерела живлення значення струмів КЗ збільшуються і,

наприклад, при КЗ лінії ЛЗ її захист 5 спрацює також швидко або ще швидше, ніж захист 1 при КЗ своєї лінії Л1 (найбільш віддаленого від джерела живлення).

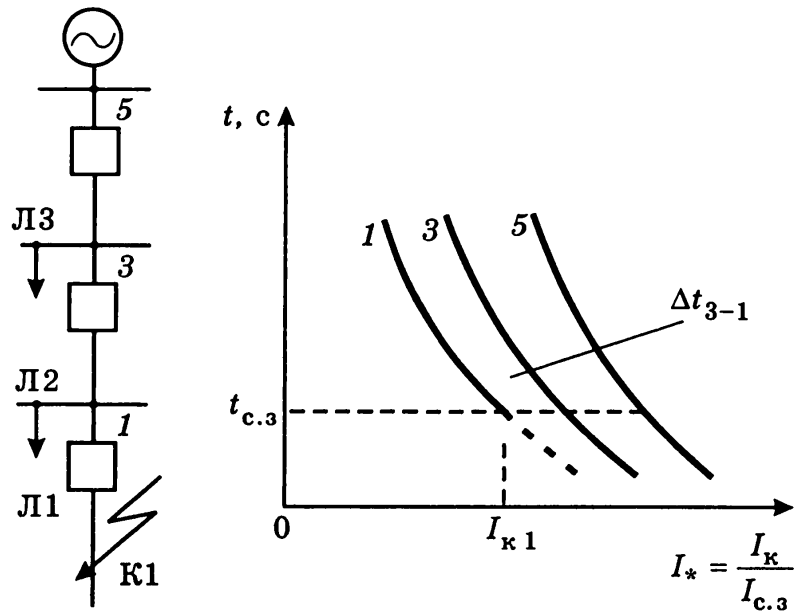


Рисунок 1.4. Узгодження характеристик 2, 3, 5

Використання зворотнозалежних часострумівих характеристик реле в порівнянні з незалежними також дозволяє значно краще узгодити час дії наступного релейного захисту з попереднім захисним пристроєм, виконаним плавкими запобіжниками, оскільки у них однотипні залежність часу спрацьовування від значення струму КЗ. Ці та інші переваги зворотнозалежних часострумівих характеристик максимальних струмових захистів пояснюють таке довге існування цих характеристик та необхідність їх реалізації та електромеханічних, та у мікропроцесорних реле.

У цифрових захистах, які використовують стандарт МЕК, є можливість вибору однієї з шести зворотнозалежних від струму часових характеристик, чотири з яких за стандартом МЕК, одна (RI) - спеціальна для узгодження з характеристиками електромеханічних реле RI (індукційного типу) (Рис. 1.5). Є ще одна характеристика (RXIDG) для захисту від замикань на землю та дві з незалежним від струму часом спрацьовування — для міжфазних КЗ та для

замикань на землю [6].

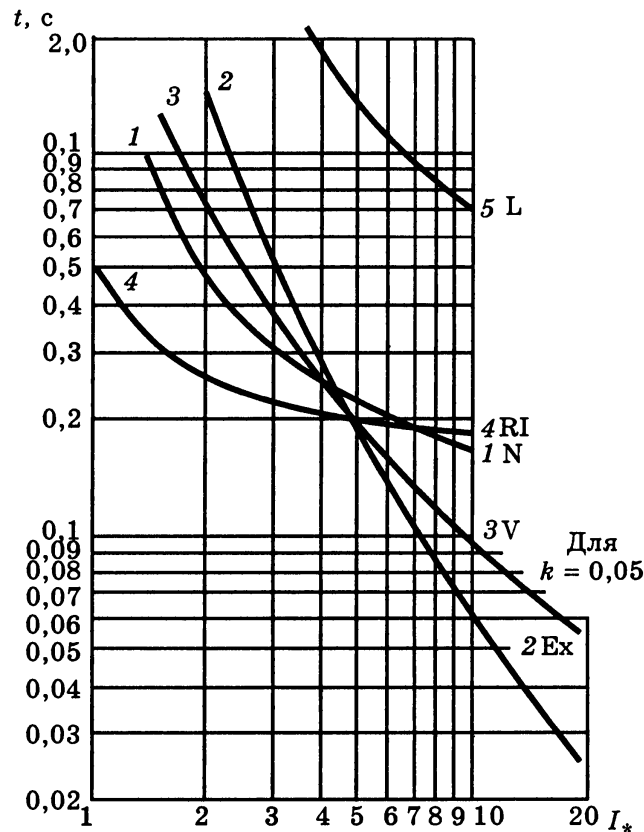


Рисунок 1.5. Часо-струмові характеристики цифрових реле SPACOM та RE_500 (ABB): 1 - нормальна (N); 2 - екстремальна (Ex); 3 - дуже залежна (V); 4 - RI-характеристика; 5 - з дуже тривалим часом спрацювання (L)

При використанні струмових захистів із зворотнимзалежними часовими характеристиками їх узгодження традиційно проводиться за допомогою графіків. Характеристики захисту будуються в осях координат «струм-час», причому ординати представляють час, а абсцис — струм. Можуть бути графіки з логарифмічними шкалами струму та часу (наприклад, при узгодженні параметрів пристроїв релейного захисту та плавких запобіжників) або з пропорційними шкалами. Можливо й так, що одна зі шкал логарифмічна, а інша - пропорційна.

Висновки по першому роздіру

Вибір тих чи інших характеристик залежить від типу захисного пристрою як на попередньому (нижчому), так і на наступному (вищому) елементах, а також від існуючих чи заданих уставок на одному з цих елементів цифрових

захистів різних фірм-виробників можуть бути записані й інші характеристики захисту від між фазними КЗ, але, як правило, у всіх відомих реле є також і «нормальна» характеристика за стандартом МЕК.

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИП ВИКОНАННЯ АДАПТИВНОГО МІКРОПРОЦЕСОРНОГО СТРУМОВОГО НАПРЯМЛЕНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ

2.1 Обґрунтування функціональної схеми адаптивної мікропроцесорного струмового спрямованого захисту лінії

Розглядається один з принципів виконання адаптивного мікропроцесорного струмового спрямованого захисту лінії від міжфазних коротких замикань. На сьогоднішній день пристрої струмового спрямованого захисту від міжфазних коротких замикань виконуються зазвичай з незалежною характеристикою витримки часу [1,2] і містять вимірювальні органи струму (ВОС), що включаються на повні струми фаз об'єкта, що захищається, і напрямки потужності, що включаються на повні струми фаз і міжфазні напруги як правило по так званій 90-градусній схемі [3].

Для прискорення відключення КЗ у випадку застосовуються три щаблі: перший ступінь – струмова відсічка без витримки часу (СВ); другий ступінь - струмове відсічення з відносно невеликою витримкою часу (СВВЧ); третій ступінь – максимальний струмовий спрямований захист (МСЗ) із значною витримкою часу.

У таких пристроях міжфазні КЗ на початку лінії відключаються без витримки часу. СВ рекомендується до застосування, якщо воно захищає щонайменше 18–20 % довжини лінії. Решта лінії захищається СВВЧ. Третій ступінь є резервним до перших двох. КЗ по всій довжині лінії відключаються щаблем з великими витримками часу, особливо у головних ділянках мережі. Такі захисту мають значну кількість ВОС та обмежену захистоспроможність головним чином першого ступеня (СВ).

Захищеність визначається довжиною лінії, що захищається кожним щаблем. Довжина лінії, що захищається СВ, визначається графічно по кривим спадання струмів КЗ по довжині лінії $I_{кз} = f(l)$, побудованим для

максимального та мінімального режимів роботи, та струму спрацьовування захисту.

Струм спрацьовування СВ вибирається за умовою відбудови від максимального значення трифазного струму КЗ $I_{КЗ\max}^{(3)}$ в кінці лінії, що захищається за формулою

$$I_{CЗ}^I = k_{від} \cdot I_{КЗ\max}^{(3)}, \quad (2.1)$$

де $I_{КЗ\max}^{(3)}$ - найбільший струм трифазного КЗ в кінці ділянки, що захищається.

Довжина лінії, що захищається, визначається в мінімальних режимах роботи, коли опори джерел живлення, трансформаторів, значно збільшуються. Наприклад, опори трансформаторів з РПН на різних положеннях регулятора можуть змінюватись у 2–2,5 рази, що призводить до різкої зміни струму КЗ.

В результаті СВ не захищає початок лінії (або захищає її невелику частину) та не може бути застосована.

Струм спрацьовування СВВЧ вибирається за умовою погодження зі струмом спрацьовування СВ наступної лінії

$$I_{CЗ}^{II} = k_n \cdot I_{CЗ}^I. \quad (2.2)$$

Витримка часу СВВЧ вибирається на ступінь селективності часу спрацьовування СВ наступної лінії.

Струм спрацьовування $I_{CЗ}^{III}$ третього ступеня (МСЗ) вибирається за умовою відбудови від максимальних навантажувальних струмів з урахуванням перевантажень та самозапуску електродвигунів навантаження, а також інших факторів.

Витримка часу МТЗ вибирається за умовою узгодження з витримками часу захисту мережі і може бути значною, особливо на головних ділянках мережі.

Пропонований спосіб принципу адаптивності мікропроцесорного струмового спрямованого захисту лінії ґрунтується на визначенні відстані до

точки короткого замикання та порівнянні отриманої величини з довжиною ділянки, що захищається. Якщо при порівнянні виявляється, що пошкодження знаходиться в зоні, що захищається, то відключення пошкодженої ділянки здійснюється без витримки часу. Це дозволяє підвищити захистом при збереженні високої швидкодії.

Визначення відстані до точки короткого замикання здійснюється в блоці визначення відстані до точки КЗ, яке розраховується наступним виразом [4]:

$$l_{КЗ} = \frac{u}{r_{num} \cdot i + L_{num} \cdot i'}, \quad (2.2)$$

де u , i , i' – відповідно міжфазна напруга контуру КЗ, різниця фазних струмів цього контуру і перша похідна цього струму;

r_{num} , L_{num} – питомі активний опір та індуктивність лінії.

У пороговому елементі проводиться порівняння $l_{КЗ}$ із довжиною лінії $l_{л}$. Якщо КЗ знаходиться в межах лінії $l_{КЗ} < l_{л}$, що захищається, то його можна вимкнути без витримки часу. Якщо пошкодження розташоване за межами лінії $l_{КЗ} > l_{л}$, що захищається, то його слід відключати з витримкою часу третього ступеня (МСЗ), обраного за умовою узгодження витримок часу захисту мережі.

Відстань до точки КЗ може бути визначена досить точно за рахунок виключення впливу змін опору систем живлення, силових трансформаторів і таким чином КЗ на значній частині довжини лінії (приблизно 70-90 % $l_{л}$ залежно від точності визначення $l_{КЗ}$) можуть бути вимкнені без витримки часу.

Через похибки у визначенні $l_{КЗ}$ для забезпечення селективної роботи пристрою в пороговому елементі порівняння $l_{КЗ}$ потрібно робити не з фактичної довжиною лінії $l_{л}$, а зі збільшеною довжиною $k_{п} l_{л}$. Величина цього коефіцієнта залежить від точності визначення КЗ і може бути знижена шляхом урахування всіх або частини факторів, що впливають. Такими факторами є: похибки вимірювальних трансформаторів, похибки розрахунку, наявність перехідних опорів у місці ушкодження, точність завдання питомих

параметрів лінії r_{num} , L_{num} і т.д. .

При необхідності розрахунок $l_{кз}$ може виконуватися не за формулою (2.3), а за складнішими формулами, що дозволяють підвищити точність розрахунку.

На рис. 2.1 наведена функціональна схема адаптивної мікропроцесорної струмового спрямованого захисту лінії [2].

Пристрій містить блоки визначення відстані до місця ушкодження (блоки 1, 2, 3), вимірювальні органи потужності (ВОП) (блоки 4, 5, 6), вимірювальні органи струму (ВОС) (блоки 7, 8, 9). ВОП та ВОС підключені до вимірювальних трансформаторів струму на фазні струми i_a , i_b , i_c , а блоки визначення відстані до місця ушкодження – на різницю фаз $(i_a - i_b)$, $(i_b - i_c)$, $(i_c - i_a)$. До вимірювальних трансформаторів напруги на міжфазну напругу U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} підключені ВОП та блоки визначення відстані до місця пошкодження. Виходи блоків визначення відстані до місця ушкодження l_a , l_b , l_c підключені до входів порогових елементів ПЕ (блоки 10, 11, 12), виходи яких разом з виходами вимірювальних органів потужності ВОП через логічні елементи І2 (блоки 13, 14, 15) та логічний елемент АБО2 (блок 16), орган сигналізації ОС2 (блок 17) пов'язані з виконавчим елементом ВЕ (блок 18). Виходи ВОС та ВОП кожної фази через логічні елементи І1 (блоки 19, 20, 21) та логічний елемент АБО1 (блок 22), орган витримки часу ДП (блок 23), орган сигналізації (ОС1) (блок 24) пов'язані з виконавчим елементом ВЕ, що вимикає вимикач об'єкта, що захищається.

Блоки визначення відстані $l_{кз}$ від місця встановлення захисту до точки КЗ дозволяють визначити відстань до точки КЗ відповідно до формули (2.3).

Органи напрямку потужності з двома підведеними величинами, які включаються за будь-якою відомою схемою, визначають напрямок потужності в кожній фазі. При КЗ на що захищається та наступних лініях на виході цих органів з'являється сигнал. При зворотному напрямку потужності (КЗ за спиною захисту) сигнал на виході цих органів відсутній.

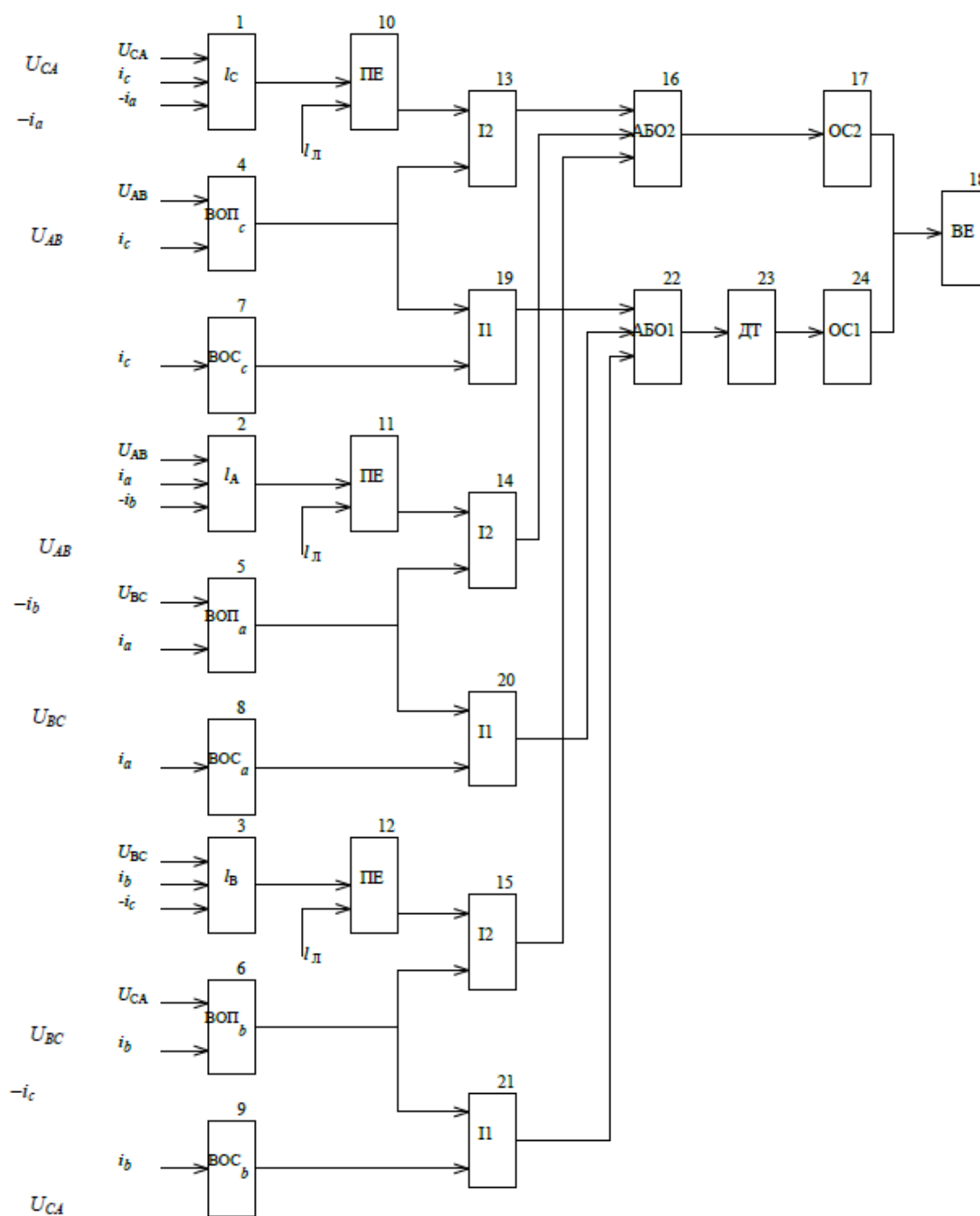


Рисунок 2.1. Функціональна схема адаптивного мікропроцесорного струмового спрямованого захисту лінії

Органи максимального струму ВОС з однією порівнюваною величиною вимірюють значення повного струму фази і порівнюють дане значення з уставкою МСЗ, що вибирається за умовою відбудови від максимальних навантажувальних струмів з урахуванням перевантажень та самозапуску електродвигунів навантаження, а також інших факторів.

Орган витримки часу ДП служить для завдання установок за часом

спрацьовування МСЗ, вибраного за умовою селективності із захистами суміжних ліній за відомою методикою.

Органи сигналізації ОС1, ОС2 служать фіксації спрацьовування захисту без витримки часу чи з витримкою часу.

Виконавчий елемент ВЕ є підсилювальною ланкою і реалізує сигнали захисту.

Органи та елементи схеми можуть бути виконані за всіма відомими схемами на базі засобів аналогової або цифрової техніки. Доцільно для реалізації пристрою використовувати мікроконтролери, що серійно випускаються промисловістю (мікропроцесорні системи).

Пристрій працює наступним чином. Струми фаз i_a, i_b, i_c від вимірювальних трансформаторів струму лінії, що захищається надходять на входи ВОС вимірювальних органів 4, 5, 6, 7, 8, 9, а на входи блоків 1, 2, 3 подаються різниці фазних струмів $(i_a - i_b)$, $(i_b - i_c)$, $(i_c - i_a)$. Від вимірювальних трансформаторів напруги на входи блоків 1, 2, 3, 4, 5, 6 підводяться міжфазні напруги U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} .

У нормальному режимі, при перевантаженнях або самозапуску електродвигунів в залежності від напрямку потужності у фазах лінії, що захищається на виходах блоків 4, 5, 6 можуть існувати сигнали, а сигнали на виходах блоків 7, 8, 9 кожної фази відсутні, так як струми у фазах лінії менше струмів спрацьовування $I_{СЗ}^{III}$. На виходах порогових елементів 10, 11, 12 сигнали також відсутні, оскільки за відсутності пошкодження відстані $l_{КЗ}$, що визначаються в блоках 1, 2, 3, більше довжини лінії l_L . Сигнали на виходах логічних елементів 13, 14, 15, 19, 20, 21, 16, 22 та виконавчого елемента 18 відсутні.

При міжфазних КЗ на лінії, що захищається, спрацьовують ВОП 4, 5, 6. При збільшенні струмів, що перевищують значення $I_{СЗ}^{III}$ спрацьовують ВОС 7, 8, 9, і сигнали через логічні елементи 19, 20, 21, 22 надходять на орган витримки часу 23. Якщо відстань до точки КЗ, що розраховується в блоках 1,

2, 3: $I_{КЗ} < k_n I_{л}$, то залежно від виду міжфазного КЗ на виходах одного або всіх порогових елементів 10, 11, 12 з'являються сигнали, які через логічні елементи 13, 14, 15, 16, орган сигналізації 17 надходять на виконавчий елемент 18. Вимикач пошкодженої лінії вимикається без витримки часу. При КЗ в кінці лінії, що захищається, або за її межами, коли КЗ $I_{КЗ} > k_n I_{л}$, сигнали на виходах порогових елементів 10, 11, 12 відсутні, але є сигнал на вході органу витримки часу 23. Після закінчення заданої витримки часу, що вибирається за умовою селективності із захистами суміжних ліній, на виході органу 23 з'являється сигнал, який через орган сигналізації 24 надходить на виконавчий елемент 18. Вимикач лінії вимикається з витримкою часу.

При КЗ "за спиною" захисту (при зворотному напрямку потужності КЗ) на виходах одного або всіх ВОП та порогових елементів ПЕ можуть з'являтися сигнали. Однак сигнал на виконавчий елемент ВЕ не надходить, оскільки сигнали на виходах всіх ВОП відсутні [2].

2.2 Принципи виконання струмового захисту ліній з односторінним живленням від міжфазних коротких замикань

Існуючі струмові захисту ліній з одностороннім живленням від міжфазних коротких замикань відключають пошкодження з відносно великими витримками часу, особливо на головних ділянках мережі, які до того ж залежать від віддаленості ділянки мережі від джерела живлення, а також у багатьох випадках мають недостатню чутливість до несиметричних КЗ, коли струми навантаження співмірні за величиною зі струмами КЗ [1]. В основу виконання струмового захисту з більш високими однойменними показниками технічної досконалості можуть бути покладені такі принципи.

У процесі роботи лінії здійснюється контроль струмів фаз I_A , I_B , I_C . При цьому із струмів I_A , I_B , I_C виділяються відповідно максимальне I_{\max} та мінімальне I_{\min} значення, за якими виявляється вид режиму. Для цього використовується співвідношення [16]:

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} \geq 0,5. \quad (2.3)$$

При виконанні умови (2.3) має місце несиметричний режим, інакше режим є симетричним [1,3]. Далі значення I_{\max} порівнюється зі струмом спрацьовування для режимів двофазного КЗ $I_{C3}^{(2)}$ або трифазного КЗ $I_{C3}^{(3)}$ відповідно при дотриманні або недотриманні умови (2.3). Величини $I_{C3}^{(2)}$ і $I_{C3}^{(3)}$ розраховуються за відомими методиками [4-7].

Якщо I_{\max} перевищує заданий струм спрацьовування, проводиться визначення місця КЗ, в іншому випадку здійснюється подальший контроль струмів фаз лінії. Місце КЗ встановлюється за відносним значенням відстані від місця встановки захисту до точки ушкодження l_{*K3} з використанням наступного виразу:

$$l_{*K3} = \frac{(kI_{K1}^{(3)} - I_{K3})I_{K2}^{(2)}}{(I_{K1}^{(3)} - I_{K2}^{(3)})I_{K3}}, \quad (2.4)$$

де $I_{K1}^{(3)}$, $I_{K2}^{(3)}$ – струми трифазних КЗ відповідно при ушкодженнях на початку і в кінці лінії, що захищається, що розраховуються за відомими методиками [4–7]; I_{K3} – середнє із трьох або двох значень струмів пошкоджених фаз; k – коефіцієнт, який залежить від виду ушкодження, при трифазних КЗ $k = 1$, а за двофазних КЗ $k = 0,5 \sqrt{3}$.

Якщо КЗ знаходиться в межах лінії, що захищається, то $l_{*K3} \leq 1$ і її слід відключати без витримки часу. Коли пошкодження розташоване на суміжній лінії, то $l_{*K3} > 1$ і лінія, що захищається, повинна відключатися з витримкою часу, узгодженої із часом спрацьовування інших захистів мережі [8, 9]. При цьому витримка часу захисту формується з використанням наступного виразу:

$$t_{C31} = \left(1 + \frac{(kI_{K1}^{(3)} - I_{K3})I_{K3}^{(3)}}{(I_{K2}^{(3)} - I_{K3}^{(3)})I_{K3}} \right) \cdot \Delta t, \quad (2.5)$$

де $I_{K2}^{(3)}$, $I_{K3}^{(3)}$ – струми трифазних КЗ відповідно при ушкодженнях на початку і наприкінці суміжної лінії, що розраховуються за відомими методами [4-7]; Δt

$= 0,3-0,5$ с - ступінь селективності; $I_{KЗ}$, k – те саме, що у (2.4).

Функціональна схема струмового захисту, що забезпечує реалізацію викладених принципів її виконання, наведено на рис. 2.2.

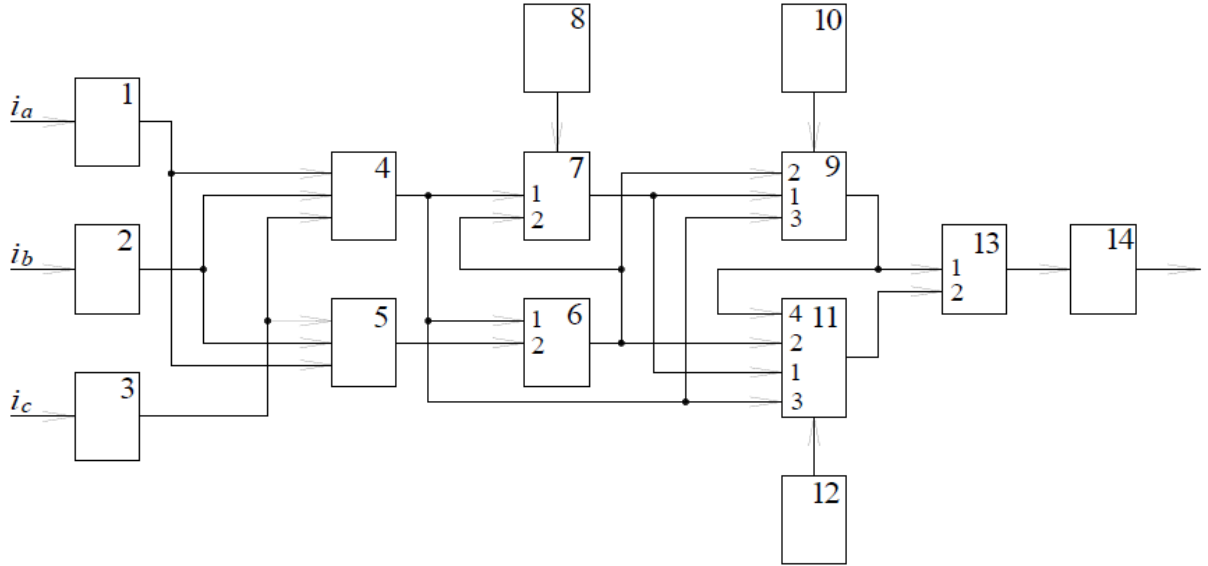


Рисунок 2.2. Функціональна схема струмового захисту

Захист містить вхідні перетворювачі струму 1, 2, 3, що підключаються до вимірювальних трансформаторів струму лінії, що захищається, максиселектор 4 і мініселектор 5, блок визначення виду режиму 6, вимірювальний орган 7 з блоком завдання уставок 8, блок визначення місця КЗ 9 з блоком завдання параметрів 10, блок розрахунку та контролю витримки часу 11 з блоком завдання параметрів 12, логічний елемент АБО 13, виконавчий елемент 14, відключає вимикач лінії, що захищається.

Вхідні перетворювачі струму формують вихідні сигнали з струмів i_a , i_b , i_c , які пропорційні відповідно до фаз I_A , I_B , I_C . Максi- і міні-селектори призначені для виділення з струмів I_A , I_B , I_C відповідно максимального I_{\max} і мінімального I_{\min} значень. Блок визначення виду режиму виявляє несиметрію струмів фаз за співвідношенням (2.3). Якщо умова (2.3) виконується, має місце несиметричний режим і на виході блоку 6 з'являється сигнал, в іншому випадку – режим симетричний і сигнал на виході блоку 6 відсутня.

Вимірювальний орган максимальної дії порівнює значення струму I_{\max} із

струмами спрацьовування, що задаються в блоці 8, де містяться їх значення для режимів трифазного КЗ $I_{C3}^{(3)}$ та двофазного КЗ $I_{C3}^{(2)}$ ю При наявності на другому вході вимірювального органу сигналу порівняння проводиться зі значенням $I_{C3}^{(2)}$ інакше – зі значенням $I_{C3}^{(3)}$

Блок визначення місця КЗ призначений для фіксації місця пошкодження на основі (2.4) за величиною струму I_{K3} , що представляє собою усереднену величину декількох значень I_{max} , з використанням параметрів, що задаються в блоці 10, де містяться значення трифазних струмів КЗ в точках К1 і К2 (рис. 2.3) відповідно $I_{K1}^{(3)}$ та $I_{K2}^{(3)}$ а також значень k для режимів трифазного КЗ ($k = 1$) і двофазного КЗ. $k = 0,5\sqrt{3}$. При наявності на другому вході блоку 9 сигналу в (2.4) використовується значення $k = 0,5\sqrt{3}$ а за відсутності $k = 1$. Блок визначення місця КЗ функціонує тільки в режимах пошкоджень за наявності на його першому вході вирішального сигналу, що надходить з виходу вимірювального органу.

Лінія Л1 (рис. 2.3) є основною зоною струмового захисту А1, і КЗ в межах усієї її довжини відключаються без спеціально створюваної витримки часу з часом спрацьовування, що є власним часом дії захисту. Лінія Л2 для струмового захисту А1 є зоною резервування, і пошкодження у всіх її точках повинні відключатися з витримкою часу.

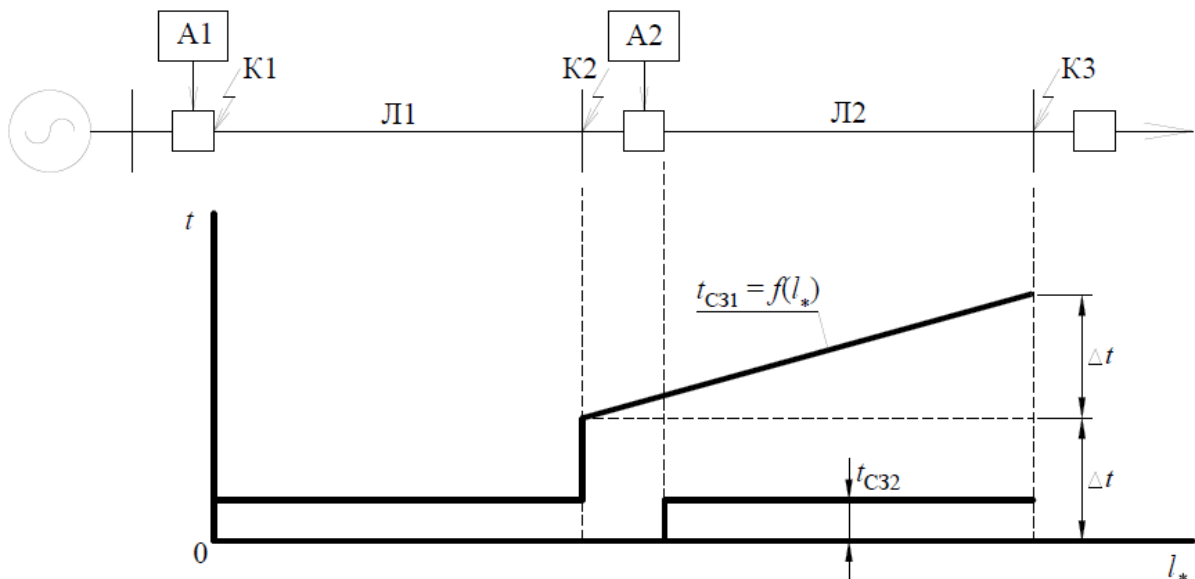


Рисунок 2.3. Характеристика спрацьовування струмового захисту.

Блок розрахунку та контролю витримки часу призначений для визначення та створення часу спрацьовування захисту А1 при пошкодженнях у зоні резервування на лінії Л2 з використанням (2.5) за величиною струму I_{K3} , що є усередненою величиною декількох значень I_{max} , на основі параметрів, що задаються в блоці 12, де містяться значення трифазних струмів КЗ в точках К2 і К3 (рис. 2) відповідно $I_{K2}^{(3)}$ і $I_{K3}^{(3)}$, значення k для режимів трифазного КЗ ($k = 1$) і двофазного КЗ $k = 0,5\sqrt{3}$, а також значення Δt . За наявності на другому вході блоку 11 сигналу в (2.5) використовується значення $k = 0,5\sqrt{3}$, а за відсутності $k = 1$. Блок 11 функціонує тільки в режимах КЗ за наявності на його першому вході дозволяючого сигналу, що надходить з виходу вимірювального органу, та за відсутності забороняючого сигналу на четвертому вході, що подається з виходу блоку 9.

Виконавчий елемент реалізує вихідні команди захисту на відключення вимикача.

Всі блоки та елементи функціональної схеми струмового захисту можуть бути реалізовані на базі засобів аналогової та цифрової техніки. В якості останньої передбачається використання сучасних мікропроцесорних засобів.

Запропонований струмовий захист функціонує в такий спосіб. Вхідні струми i_a, i_b, i_c від вимірювальних трансформаторів струму захищається лінії надходять на входи перетворювачів струму 1, 2, 3, вихідні сигнали яких пропорційні струмам фаз I_A, I_B, I_C . Макс- і міні-селектори виділяють із зазначених струмів відповідно найбільше I_{max} та найменше I_{min} значення. У блоці визначення виду режиму за величинами I_{max} та I_{min} визначається ступінь несиметрії струмів фаз з використанням (2.3).

У нормальному режимі, при симетричному навантаженні, самозапуску електродвигунів, а також при трифазних КЗ сигнал на виході блоку 6 відсутній. При несиметричному перевантаженні зі значним ступенем несиметрії або двофазних КЗ на виході блоку 6 присутній сигнал.

Поточне значення струму I_{max} у вимірювальному органі порівнюється з $I_{C3}^{(2)}$

і $I_{C3}^{(3)}$ які містяться в блоці 8 і вибираються в залежності від виду режиму, що встановлюється за сигналом на другому вході блоку 7. У режимах відсутності пошкоджень на лінії, що захищається значення струму I_{\max} не перевищує жоден із струмів спрацьовування вимірювального органу і сигнал на його виході відсутня. При виникненні КЗ струм I_{\max} перевищує відповідний струм спрацьовування, на виході блоку 7 з'являється сигнал, який надходить на перші входи блоку місця визначення короткого замикання і блоку розрахунку і контролю витримки часу, дозволяючи їх функціонування.

У блоці 9 відповідно до (2.5) після визначення I_{K3} шляхом усереднення кількох значень I_{\max} з використанням параметрів, що містяться в блоці 10, що вибираються відповідно до виду КЗ, який встановлюється в результаті аналізу сигналу на другому вході блоку 9, визначається I_{*K3} та порівнюється з довжиною лінії у відносних одиницях, рівною 1.

При $I_{*K3} \leq 1$ місцем КЗ є лінія Л1, що захищається (рис. 2.3), і на виході блоку 9 з'являється сигнал, який надходить на перший вхід логічного елемента АБО, а з його виходу впливає на виконавчий елемент, і вимикач лінії, яка захищається Л1 відключається без спеціально створюваної витримки часу. При цьому сигнал із виходу блоку 9 надходить на четвертий вхід блоку 11, забороняючи його функціонування.

Якщо $I_{*K3} > 1$, місцем КЗ є суміжна лінія Л2 (рис. 2.3), сигнал на виході блоку 9 не виробляється і дозволяється функціонування блоку розрахунку і контролю витримки часу. У блоці 11 на основі (2.5) після визначення I_{K3} шляхом усереднення кількох значень I_{\max} з використанням параметрів, що містяться в блоці 12 і вибираються в залежності від виду КЗ, який визначається за результатами аналізу сигналу на другому вході блоку 11, обчислюється час спрацьовування захисту для зони резервування та організується його відлік. Після закінчення зазначеного часу на виході блоку 11 з'являється сигнал, який надходить на другий вхід логічного елемента АБО, впливаючи з його виходу на виконавчий елемент, і вимикач лінії, що захищається відключається з витримкою часу.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень, а також те, що відключення КЗ у межах основної зони захисту забезпечується без витримки часу, а кінці зони резервування – з витримкою часу, не перевищує $2\Delta t$ всіх ділянках, включаючи головні ділянки мережі.

Висновки по другому розділу

Реалізація запропонованих принципів виконання струмового захисту ліній забезпечить підвищення її технічної досконалості за показниками швидкодії та чутливості.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЦИФРОВИХ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК У СИСТЕМІ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ MATLAB-SIMULINK

Впровадження нових технологій в енергетичній галузі, постійне зростання потужностей, які генеруються, ускладнення топології мережі передачі та розподілу електричної енергії є причиною виникнення нових, раніше не характерних режимів роботи енергетичної системи. Ця обставина вимагає від виробників цифрових пристроїв релейного захисту (ЦПЗ) попереднього випробування запланованих до випуску зах в умовах, максимально наближених до реальних. Найбільш раціональний і ефективний спосіб даних випробувань - моделювання, що дозволяє отримати первинний досвід експлуатації впроваджуваних рішень [8].

Відомі електродинамічні (фізичні) та аналогові види моделей електроенергетичної системи (ЕС). Переваги таких моделей полягають у масштабній точності об'єктів, що моделюються, проте дороговизна, займане простір, складність налаштування і перебудови моделей обмежують їх широке використання.

Найбільш поширеним нині є метод математичного моделювання ЕС та ЦПЗ. Сучасні випробувальні комплекси (ВК) використовують цей метод для отримання вхідних інформаційних сигналів, що представляють собою струми і напруги, що підводяться до ЦПЗ або до його моделі, рівні за величиною і формою вхідним сигналам, відповідним реальним умовам експлуатації. ВК для ЦПЗ розвиваються та вдосконалюються за двома основними напрямками [8].

Перший напрямок - застосування комплексного математичного моделювання ЕС спільно з ЦПЗ, що відкриває можливість відпрацьовувати нові принципи побудови цифрових захистів і перевіряти їх працездатність при аварійних режимах, які неможливо штучно повторити на реальних

енергетичних об'єктах.

Другий напрямок - використання комплексних математичних моделей ЕС для отримання інформаційних сигналів ЦПРЗ у робочих та аварійних режимах об'єкта, що захищається. Для цієї мети створюються ВК, що складаються з апаратної та програмної частин. Програмна частина, що реалізує комплексні математичні моделі ЕС і вимірювальних трансформаторів, відтворюється на персональному комп'ютері (ПК), де формуються тимчасові послідовності миттєвих значень вторинних струмів і напруг для всіх режимів, на які повинна реагувати випробуваний захист [10]. В апаратній частині, що містить перевірну установку (ПУ), ці коди перетворюються на аналогові сигнали, посилюються і в реальному масштабі часу подаються на випробуване ЦПРЗ.

3.1 Загальний вигляд комп'ютерного випробувального комплексу

Основною вимогою до ВК є достовірність результатів моделювання режимів роботи ЕС, що досягається в першу чергу правильним вибором структури та повнотою математичного опису всіх елементів, що входять до ЕС. Оскільки повну математичну модель всієї ЕС, за якою розраховувалися б вхідні сигнали релейного захисту, скласти неможливо, то з ЕС виділяється фрагмент у вигляді так званого узагальненого електроенергетичного об'єкта (УЕО) [9]. Розрахункова схема УЕО повинна містити всі елементи, що надають помітний кількісний і якісний вплив на вхідні сигнали (вторинні струми трансформаторів струму), що підводяться до пристрою захисту.

Сукупність моделі УЕО та моделі трифазної групи трансформаторів струму (ТС) складає комп'ютерний програмний комплекс (КПК) вироблення вхідних сигналів захисту (рис. 3.1), а КПК і модель ЦПРЗ утворюють комп'ютерний випробувальний комплекс (КВК).

Структура математичної моделі УЕО може бути жорсткою або гнучкою. Жорстка модель характеризується постійним набором елементів з можливістю зміни параметрів. Вона реалізується на основі детального математичного опису електричних і магнітних контурів моделюваних елементів шляхом вирішення десятків диференціальних та алгебраїчних рівнянь.



Рисунок 3.1. Комп'ютерний випробувальний комплекс

Із аналізу використання подібних програм для проведення наукових досліджень, а також зіставлення результатів моделювання з натурними випробуваннями, при яких похибка струму не перевищувала 11 % [4, 10], дозволяють стверджувати, що результати комплексного математичного моделювання з високим ступенем точності та достовірності відтворюють процеси у реальних енергетичних об'єктах. Тому КПК з жорсткою структурою УЕО можна розглядати як еталон, з яким можна порівнювати результати моделювання таких же електроенергетичних об'єктів, але виконаних в інших системах моделювання, наприклад MatLab-Simulink.

Для гнучкої моделі УЕО набір елементів необмежений. Вона реалізується в СДМ MatLab-Simulink, до складу якої входить пакет розширення SimPowerSystems (SPS), орієнтований на імітаційне моделювання електротехнічних пристроїв. У пізніших версіях СДМ MatLab-Simulink цей пакет називається Simscape Power Systems [12].

У СДМ MatLab-Simulink принципово змінено характер вимог до математичного забезпечення та управління всім ходом обчислювального процесу. Математична модель представляється як структурної схеми і вимагає написання коду програми через наявність бібліотеки готових програм, використовуваних на вирішення окремих прикладних завдань [11]. Це особливо важливо для завдань інженерної спрямованості, коли потрібно самостійно змодельовати фрагмент енергосистеми, не заглиблюючись у

тонкощі математичного опису самих елементів. При цьому ретельно підібрані демонстраційні приклади пакету SPS створюють відчуття простоти використання бібліотечних блоків, проте відхилення параметрів від заданих «за замовчуванням» часто призводить до неправильного функціонування моделі. Тому дуже важливим є етап підготовки вихідних даних для моделей елементів УЕО та досліджуваного режиму.

Крім того, в стандартних бібліотеках SPS присутні не всі необхідні моделі електроустаткування. Наприклад, відсутня модель ТС, а для моделі силового трансформатора та деяких інших блоків не зазначені методики розрахунку їх параметрів. При цьому саме моделювання трансформаторів струму, як елементів, сигнали яких безпосередньо впливають на вхідні ланцюги захисту, слід приділяти особливу увагу.

Неточне завдання параметрів у будь-якому блоці структурної схеми призводить до зниження достовірності результатів моделювання, незважаючи на те, що всі моделі, що входять до цього пакету, перевірені в лабораторіях канадського виробника електроенергії – компанії Hydro-Québec, де підтверджено адекватність їх реалізації та математичного опису [12]. Тому результати, одержувані від КПК, реалізованих в СДМ MatLab-Simulink з використанням блоків SPS, необхідно зіставити з результатами від інших КПК, прийнятих за еталонні, а також з природними випробуваннями. Якщо досягається високий збіг результатів від різних джерел, це свідчить про те, що моделі, розроблені в Simulink-SimPowerSystems, адекватно функціонують і можуть бути використані для побудови інших аналогічних систем, структура яких відрізняється від еталонної. Як приклад розглянемо реалізацію випробувальних комплексів з жорсткою та гнучкою структурами УЕО для перевірки працездатності цифрових струмових захист ліній.

3.2 Комп'ютерний програмний комплекс із жорсткою структурою узагальненого електроенергетичного об'єкта для дослідження працездатності струмових цифрових захист ліній електропередачі

Узагальнений електроенергетичний об'єкт містить математичний опис

лінії, що захищається, її джерел живлення та вимірювальних трансформаторів, а також суміжних елементів, що надають помітний кількісний і якісний вплив на характер перебігу аварійних та післяаварійних режимів [13]. Математичний опис стаціонарних елементів розрахункової схеми включає в загальному випадку дві групи рівнянь:

- диференціальні рівняння – це рівняння рівноваги ЕРС та рівняння балансу струмів у вузлах розрахункової схеми з ємностями;
- рівняння алгебри – це рівняння балансу струмів у вузлах без ємностей, а також рівняння балансу МДС в контурах магнітопроводів і характеристики намагнічування.

Основними результатами роботи КПК повинні бути значення вторинних струмів ТС в ланцюзі лінії, що захищається, т. б. вхідні сигнали випробовуваного захисту. Розглянутий КПК можна розробляти у системі об'єктно-орієнтованого програмування Delphi [14]. Програма-оболонка КПК може мати вигляд (рис. 3.2) з використанням розрахункового модифікованого фортранівського модуля, яка за допомогою інтерактивного графічного інтерфейсу дозволяє активізувати вікна введення та редагування вихідних даних окремих елементів розрахункової схеми, здійснювати вибір лінії, місця та виду замикання, змінювати параметри розрахункового режиму та виконувати розрахунок заданого режиму лінії. Результати розрахунку КПК у вигляді числових послідовностей значень вторинних струмів ТС записуються у зовнішній файл результатів і можуть бути раховані зовнішнім програмним забезпеченням.

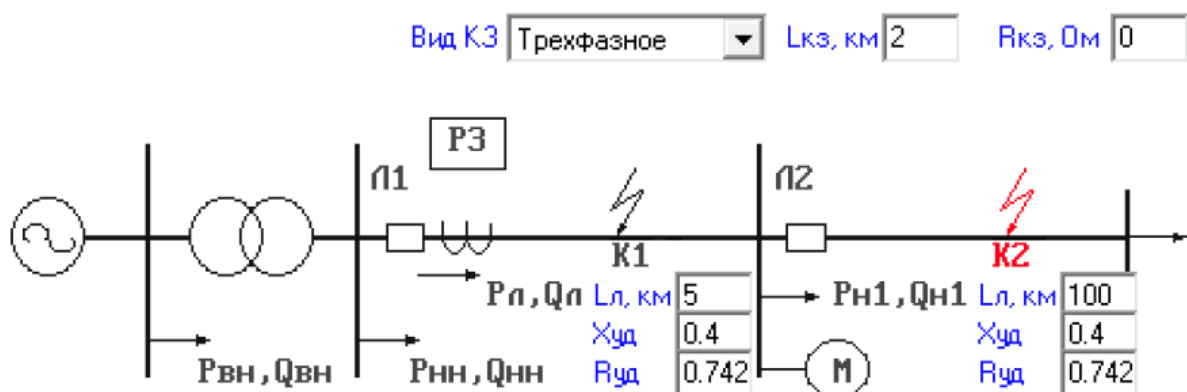


Рисунок 3.2. Інтерактивний графічний інтерфейс комп'ютерного програмного комплексу

3.3 Комп'ютерний випробувальний комплекс з гнучкою структурою узагальненого електроенергетичного об'єкта на дослідження працездатності струмових цифрових захист ліній електропередачі

Відповідно до рис. 3.2 у СДМ MatLab з блоків пакетів Simulink та SPS створено модель УЕО та модель цифрового струмового захисту лінії Л1 (рис. 3.3) [11]. Безперечною перевагою Simulink-SimPowerSystems є те, що складні електротехнічні системи можна моделювати, поєднуючи методи імітаційного та структурного моделювання.

Наприклад, первинну частину енергосистеми можна виконати з використанням імітаційних блоків SPS, а ЦПРЗ – за допомогою звичайних блоків Simulink, що відображають лише алгоритм роботи, а не його електричну схему.

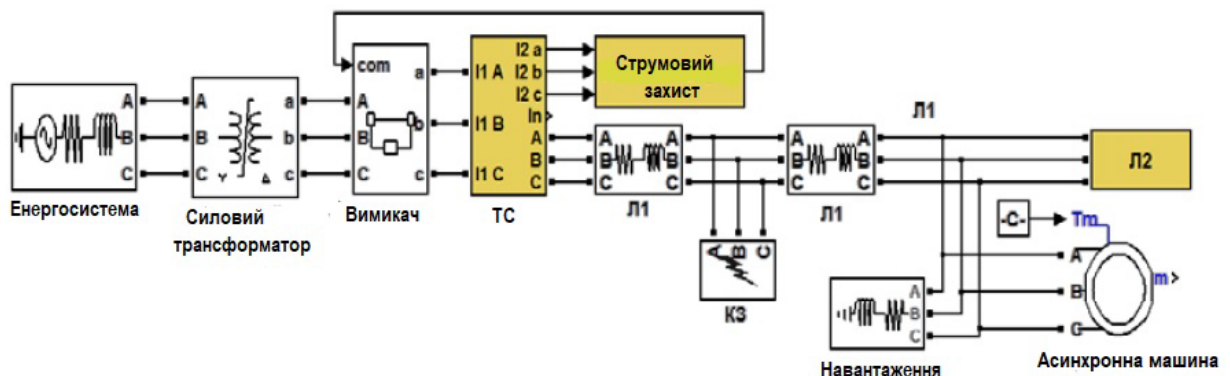


Рисунок 3.3. Комп'ютерний випробувальний комплекс у системі динамічного моделювання MatLab-Simulink-SimPowerSystems

Математичні моделі електроенергетичних об'єктів є бібліотечними блоками пакета SPS, визначення більшості параметрів яких зазвичай не викликає труднощів [12]. Проте практично у кожному бібліотечному блоці є кілька ключових параметрів, що вимагають додаткових розрахунків для правильного функціонування моделі. Далі у статті наведено основні блоки, у тому числі формується модель розподільної мережі із зазначенням особливостей розрахунку їх параметрів.

Енергосистема моделюється блоком 3-Phase Source (трифазне джерело напруги) із бібліотеки SPS. До основних параметрів, що вимагають додаткового розрахунку, відносяться: власний опір джерела R_s (source resistance), Ом та власна індуктивність джерела L_s (source inductance), Гн. Індуктивність системи живлення L_s може бути визначена по заданому струму короткого замикання $I_k^{(3)}$ на шинах вузла навантаження напругою $U_{ном}$, на якому виробляються випробування [17]:

$$L_s = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_k^{(3)} \cdot \omega_0},$$

де ω_0 – номінальна кутова частота.

Якщо встановлено потужність системи S_s , її відносний опір X_* і напруга U_s , то індуктивність системи [17]

$$L_s = X_* \cdot \frac{U_s^2}{S_s \cdot \omega_0}.$$

Активний опір можна визначити, виходячи із середнього значення постійного часу загасання аперіодичної складової ($T_s = 0,05$) струмів короткого замикання (КЗ): $R_s \cong 20L_s$.

Силовий трансформатор. Стандартна модель трифазного двообмоточного трансформатора Three-Phase Transformer (Two Windings) з бібліотеки SPS побудована на основі трьох однофазних трансформаторів [15]. Методика розрахунку моделі докладно розглянута у [9]. У табл. 3/1 наведено вирази для розрахунку у відносних одиницях (в. о.) параметрів моделі силового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток $Y/\Delta-11$, в якій використовуються тільки каталожні дані силового трансформатора: $S_{ном}$ – номінальна потужність силового трансформатора (ВА); P_k - потужність втрат короткого замикання (Вт); U_k - напруга короткого замикання (%); P_0 - потужність втрат холостого ходу (Вт); I_0 – струм холостого ходу (%).

Таблиця 3.1-Формули для розрахунку параметрів моделі трансформатора

Параметр	Значення, в. о.
Активний опір первинної і вторинної обмоток трансформатора	$R_{1(во)} = R_{2(во)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_k}{S_{ном}}$
Індуктивність первинної і вторинної обмоток трансформатора	$L_{1(во)} = L_{2(во)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_k}{100}$
Активний опір ланцюга намагнічування	$R_{m(во)} = \frac{S_{ном}}{P_0}$
Індуктивність ланцюга намагнічування	$L_{m(во)} \approx \frac{100}{I_0}$

Лінії електропередачі Л1 та Л2 (блок 3-Phase Series RLC Branch – трифазна послідовна RLC-ланцюг) [11]. Лінія, що захищається, характеризується довжиною L_l , питомими активним r_{num} і реактивним x_{num} опорами:

$$R_l = r_{num} L_l ; L_l = x_{num} L_l / \omega_0.$$

Навантаження (блок 3-Phase Series RLC Load). Стаціонарні навантаження задаються активними (Three-Phase Active Power) і реактивними (Three-Phase Inductive Reactive Power) потужностями [12].

Асинхронна машина (блок Asynchronous Machine SI Units). Докладний розрахунок параметрів асинхронної машини викладено в [10]. Крім того, у вікні завдання параметрів можна вибрати готову модель (Preset Model) машини з каталогу, в якому вказані такі параметри: потужність к. с. (HP), напруга, частота мережі та частота обертання об/хв (PRM). Для того щоб почати розрахунок схеми, що містить електричні машини, з режиму, попередньо встановлено ініціалізувати схему за допомогою графічного інтерфейсу користувача Powergui.

Вимикач (блок 3-Phase Breaker).

КЗ (блок 3-Phase Fault). Моделює трифазний пристрій, що замикає фази між собою, а також на землю [11].

Трифазна група ТС зі з'єднанням вторинних обмоток і навантажень за схемою «зірка з нульовим проводом». Оскільки бібліотечний блок ТС у

бібліотеці SPS відсутній, то зі стандартних блоків Simulink на основі тих же рівнянь, що і для жорсткої моделі, була створена та відлагоджена спрощена модель ТС з вторинним номінальним струмом 5 А, вторинною обмоткою класу точності 10Р і усередненою характеристикою намагнічування сталі магнітопроводу. Всі геометричні параметри, необхідні для моделювання ТС, розраховуються за його паспортними даними [18].

$$\begin{cases} \frac{dB_{mj}}{dt} = \frac{83,34 \cdot [(0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{Hj})i_{2j} + R_0i_0]}{K_{\text{НОМ}}(0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{\text{НОМ}j})}, & j = A, B, C; \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{1\text{НОМ}}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{\text{НОМ}}H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}, \end{cases}$$

де $I_{1\text{НОМ}}$ - номінальний первинний струм ТС; $K_{\text{НОМ}}$ – номінальна гранична кратність ТС; $R_{\text{НОМ}}$ – номінальний активний опір вторинного навантаження ТС; R_H - дійсний активний опір вторинного навантаження ТС; R_0 – активний опір нульового проводу; i_0 - миттєве значення струму, що протікає в нульовому проводі ТС; $B_m = f(H)$ - середня характеристика намагнічування електротехнічної сталі; i_1, i_2 – миттєві значення первинного та вторинного струмів ТС.

При розрахунку схеми, що містить нелінійні блоки, рекомендується використовувати такі методи вирішення диференціальних рівнянь: ode23t (метод трапецій з інтерполяцією) і ode23tb (неявний метод Рун-ге - Кутта на початку рішення і метод, що використовує формули зворотного диференціювання 2- наступному), які дають найкращі результати швидкодії [6, 10].

Висновки по третьому розділу

Система динамічного моделювання MatLab-Simulink дозволяє створювати з мінімальними витратами часу комп'ютерні програмні комплекси для випробування моделей цифрових захистів електроустановок, а також

формувати для перевіряються пристроїв захисту електрообладнання тестові впливи, що відрізняються від реальних сигналів на прийнятну для інженерних розрахунків величину.

ВИСНОВКИ

Система динамічного моделювання MatLab-Simulink дозволяє створювати з мінімальними витратами часу комп'ютерні програмні комплекси для випробування моделей цифрових захистів електроустановок, а також формувати для перевіряються пристроїв захисту електрообладнання тестові впливи, що відрізняються від реальних сигналів на прийнятну для інженерних розрахунків величину.

Запропонований принцип виконання адаптивного струмового захисту може бути покладено в основу розробки мікропроцесорних захисту ліній розподільних мереж від міжфазних коротких замикань, що дозволить вирішити проблему підвищення чутливості, що виникає при застосуванні традиційних ступінчастих струмових захистів.

Система динамічного моделювання MatLab-Simulink дозволяє створювати з мінімальними витратами часу комп'ютерні програмні комплекси для випробування моделей цифрових захистів електроустановок, а також формувати для перевіряються пристроїв захисту електрообладнання тестові впливи, що відрізняються від реальних сигналів на прийнятну для інженерних розрахунків величину.

Реалізація запропонованих принципів виконання струмового захисту ліній забезпечить підвищення її технічної досконалості за показниками швидкодії та чутливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с
2. Махлін П.В. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник / Махлін П.В., Костенко С.Ю., Кузьменко О.П. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 256 с. ISBN 978-617-529-287-7
3. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с., рис. 41, табл. 20.
4. Релейний захист та системна автоматика : лабораторний практикум В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 130 с.
5. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник /С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – Ч. 2. – 276 с., рис. 48, табл. 19.
6. Christos A. Apostolopoulos, N. Korres, Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS, European Transactions on Electrical Power, 2008.
7. CAPE User's Manual, Electrocon International, 1997.
8. Tractabel-EDF, "EUROSTAG Software," Release Notes, ver. 4.1, December 2000.
9. ASPEN User's Manual, ASPEN Inc., 1995.
10. Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Agarwal, Allan T. Johns, "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying

Algorithm for Protecting Transmission Lines,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.15, No. 1, February 2000.

11. Simulink, Getting Started Guide, The MathWorks, Inc, March 2013, Revised for Version 5.8 (Release 2013a).

12. M. Foltin, M. Ernek, Model of Slovak Power System Using SimPowerSystems, Mezinárodní konference Technical Computing, Prague 2007

13. W. A. Elmore, Protective Relaying Theory and Applications, ABB Power T&D Company Inc., 1994.

14. SH Horowitz, AG Phadke , and JS Thorp, "Adaptive transmission system relaying," IEEE Trans, on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 1436-1458, 1988.

15. NERC, 'Review of selected electric system disturbances in North America," Disturbance Analysis Working Group, Princeton, New Jersey 08540-5731, 1979-1995.

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

17. Рубаненко, О. Є. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 1251с

18. Черкашина, В. В., і В. М. Цюпа. «Аналіз алгоритмів роботи диференційного релейного захисту та їх моделювання у середовищі MATLAB». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*, вип. 1 (6), Липень 2023, с. 113-8, doi:10.20998/2224-0349.2023.01.13.