

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Єфімов Олександр Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз можливості використання та розробка варіанту алгоритмічної
моделі для дистанційного захисту ліній електропередач
(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

Єфімов О. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Рассадкіна Марина Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.ф-м.н., доцент кафедри вищої та

прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Єфімов О. М. Аналіз можливості використання та розробка варіанту алгоритмічної моделі для дистанційного захисту ліній електропередач

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 системах електропостачання .

Ціль роботи полягає в підвищенні надійності і ефективності струмових захистів електрообладнання шляхом застосування адаптації уставок спрацьовування відповідно до експлуатаційних параметрів, що змінюються мережі.

Ключові слова: релейний захист, струмовий захист, адаптація.

ABSTRACT

Efimov O. M. Analysis of the possibility of using and development of a variant of an algorithmic model for remote protection of power transmission lines

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia 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 on power supply systems.

The aim of the work is to increase the reliability and efficiency of current protection of electrical equipment by applying adaptation of the operation settings in accordance with the changing operational parameters of the network.

Keywords: relay protection, current protection, adaptation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АДАПТИВНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	7
1.1 Адаптивний релейний захист	7
1.2 Розробка алгоритмів роботи адаптивної системи захисту від струмів витоку	10
Висновки по розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	13
2.1 Моделювання пристроїв релейний захисту в графічною середовищі MATLAB SIMULINK	13
2.2 Модель електричної мережі з ізольованою нейтраллю	15
2.3 Імітаційна модель пристрою струмових захистів	19
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ УНІВЕРСАЛЬНОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА АЛГОРИТМІВ ЇЇ РОБОТИ ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЗАХИСТУ	27
3.1 Моделювання аварійних режимів при змінних параметрах контрольованої мережі	27
3.2 Визначення принципів роботи універсальної системи адаптивного підлаштування	30
3.3 Система адаптації струмових захистів	33
3.4 Моделювання роботи системи адаптації уставок спрацьовування	36
Висновки по розділу 3	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

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 навантаження елементів енергосистеми і порушення стабільної 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 на 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 надійності 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 системах електропостачання.

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

- аналіз існуючих засобів захистів електрообладнання з метою оцінки впливу умов експлуатації і режимів роботи обладнання на ефективність їх спрацьовування;
- розробка алгоритмів роботи адаптивної системи захисту від струмів витоку, при різних змінах напруги контрольованої мережі;
- розробка імітаційної моделі мережі з ізольованою нейтраллю рухової навантаженням і можливістю зміни параметрів мережі в процесі моделювання;
- визначення принципів роботи універсальною системи адаптації;
- розробка імітаційною моделі пристрої струмових захистів: максимального струмового відсічення (МСВ), максимального струмового захисту (МСЗ), захисту від однофазного замикання на землю (ОЗЗ).

Ціль роботи полягає в підвищенні надійності і ефективності струмових захистів електрообладнання шляхом застосування адаптації уставок спрацьовування відповідно до експлуатаційних параметрів, що змінюються мережі.

Об'єктом дослідження є системи релейного захисту та захисту від струмів витоку та проблема розробки та дослідження ефективних методів підвищення надійності та селективності цих систем.

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 :

Єфімов О. М., Стрельченко М.І. ПРИКЛАД АЛЬТЕРНАТИВНОГО НАЛАШТУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ПЛ 110 кВ

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

Єфімов О. М., Стрельченко М.І. МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ 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.

Єфімов О. М. ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ УСТАВОК ДИСТАНЦІЙНИХ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ ВІД БАГАТОФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ РАДІАЛЬНИХ ЛІНІЙ

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 АДАПТИВНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

1.1 Адаптивний релейний захист

РЗА постійно контролює стан електромереж для виявлення ушкоджень і ненормальних режимів в контрольованій зоні. РЗА проектується з метою досягнення найвищого рівня швидкодії, чутливості, надійності і селективності. На практиці часто не можливе задоволення всіх вимог до пристроїв РЗА одночасно. Основний конфлікт виникає у питанні надійності РЗА. У питанні надійності є дві протилежні крайнощі - надійність і безпека системи . З одного боку, РЗА має реагувати на всі види ушкоджень та ненормальні види режимів роботи, які характеризують надійність системи. При цьому можливі помилкові чи зайві спрацьовування. З іншого боку, РЗА повинна працювати правильно і безвідмовно, і не діяти в нормальних умовах, а також при таких ушкодженнях і порушення нормального режиму, при яких дія даного захисту не передбачено, що характеризує безпеку системи. Більшість спеціалістів, проектуючих захисти, як правило, схилиються до забезпечення надійності, для усунення будь-яких пошкоджень, так як в більшості випадків існують резервні джерела живлення для захищованого обладнання або використовуються засоби протиаварійної автоматики. Внаслідок збільшуються навантаження на системи електропостачання, зайві відключення, можуть спричинити собою каскадні ушкодження в системах.

Американськими вченими в області РЗА було виявлено, що неправильні дії пристроїв РЗА стали причинами великої кількості порушень в роботі енергосистем. Зайві і хибні спрацьовування надають великий вплив на виникнення та поширення каскадних аварій [6]. Дослідження CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electrique - Міжнародний Порада по великим електричним системам високого напруги) [8] показали, що 27 відсотків порушень роботи енергосистем стали наслідком неправильних дій пристроїв РЗА. Аналіз даних представлених порадою North American Electric Reliability

Council (NERC) за 17 років (1995) показав [14], що 63 відсотки порушень в електромережі пов'язані з дією захисту.

Частково корні цієї проблеми пов'язані з історією розвитку і з основами проектування РЗА. Дія захисна спрямована на спрацювання мінімальної кількості вимикачів для ізолювання пошкодженого елемента системи, який може спричинити значні пошкодження решти елементів системи. Такий алгоритм роботи РЗА був сформований 70 років тому [7]. Спочатку ідея цієї концепції була спрямована на мінімізацію ушкоджень компонентів електричної мережі, яка підходить лише для номінальних режимів роботи мережі. Однак якщо енергосистема знаходиться в не нормальних режимах роботи, наприклад, під час зниження напруги мережі або в моменти підвищеного навантаження, відключення для локалізації пошкодження, можуть стати причиною подальших каскадних аварій. Ще однією проблемою, властивою системам РЗА, є несправності, які залишаються непоміченими в нормальних режимах роботи мережі. Подібним прихованим несправностям було дано наступне визначення «дефекти, такі як несправність елемента, невідповідні налаштування або неправильне зовнішнє підключення, яке залишається непоміченим до тих пір, поки інші системні події не впливають на них, що ініціює каскадні ушкодження» [8]. Прикладом таких прихованих несправностей можуть бути відмови пристроїв РЗА або ланцюгів управління комутаційним обладнанням, а також несправність вимірювальних органів захисту, що може спричинити за собою помилкові відключення в момент пошкоджень на суміжних ділянках, що захищаються [9]. Подібні ситуації роблять необхідним розробку систем самодіагностики РЗА, а також системи оповіщення про приховані пошкодження елементів системи захистів.

В даний час навантаження на системи електропостачання стрімко зростає, що потребує інтегрованого підходу до проектування систем захистів. Без сумніву, переваги знаходяться на боці пристроїв РЗА, побудованих на базі мікропроцесорів, в порівнянні з їх аналоговими альтернативами. Вони мають значні переваги – такі, як, більш точне виділення основних гармонік струму

засобами фільтрації, функціональні переваги за рахунок використання продуктивних мікропроцесорів та можливість самодіагностики [9]. Однак усі ці факти не приводять до значного покращення швидкодії, селективності і чутливості систем РЗА. Основна проблема полягає в тому, що системи РЗА повинні бути адаптивними до змінних параметрів мережі та до режимів її роботи. Адаптивність РЗА повинна ставитися до основних, пред'явлених до них вимог, нарівні з швидкістю селективністю надійністю і чутливістю.

У літературі використовуються різні визначення поняття «адаптивна РЗА». Так в одному з джерел [1] запропоновано наступне визначення:

«Здатність систем захисту автоматично змінювати робочі параметри у відповідь на зміни стану мережі для забезпечення оптимального функціонування». Більше узагальнене визначення адаптивний РЗА наведено в іншому джерелі [11] «концепція захисту, яка дозволяє та намагається знайти коригування різних функцій захистів для того, щоб зробити їх більш пристосованими до діючих електричних умов мережі» [1].

З представлених у літературі визначень можна назвати такі основні тези, характеризуючі адаптивні захисти:

- Автоматична зміна уставок спрацьовування характеристик і функцій систем РЗА, в режимі реального часу. Ця властивість вимагає обчислення і передачі нових робочих характеристик, з центрального обчислювального пункту. Пристрої РЗА на базі мікропроцесорів мають необхідні ресурси для змін уставок у режимі реального часу. Для реалізації даної системи необхідна організація передачі даних між пристроями РЗА.
- Знаходження оптимальних уставок пристроїв РЗА, тобто таких характеристик, які задовольняють бажаному функціонуванню замість традиційного компромісу між суперечливими вимогами надійності і безпеки функціонування РЗА.

Адаптивний РЗА надзвичайно важливий напрямок, який став результатом інтеграції цифрових пристроїв захисту, інтелектуальних електронних пристроїв та систем комунікацій. Це дозволяє підлаштовувати налаштування

РЗА в відповідно до чинних параметрами мережі. Цифровий релейний захист (ЦРЗ) дає спеціалістам інструмент, що дозволяє реалізувати концепцію адаптивних захистів. Такі пристрої дозволяють адаптувати їх характеристики для оптимального функціонування енергосистем, реєструвати інформацію, яка може бути проаналізована для визначення стану всією системою і виявлення можливих проблем.

1.2 Розробка алгоритмів роботи адаптивної системи захисту від струмів витоку

Для забезпечення безпеки експлуатації електричних мереж із ізольованою нейтраллю та електрообладнання на промислових підприємствах застосовуються апарати захисту від струмів витоків [3]. У процесі експлуатації в мережах електропостачання змінного струму промисловості через обмежену потужність мереж спостерігаються значні коливання напруги (-30% до $+20\%$ від номінального) [3], що суттєво перевищує допустимі стандартами норми. При цьому коливання можуть мати ступінчастий характер, пов'язаний з підключенням та відключенням різного електроустаткування, монотонним характером – при плавній зміні навантаження, а також гармонійний характер – при коливаннях навантаження або при періодичних процесах підключення-вимкнення обладнання. Застосування частотно-регульованих електроприводів на виробництві також супроводжується змінами амплітуди напруги мережі, що захищається. Однак уставки спрацьовування захистів залишаються незмінними, що призводить до зниження рівня безпеки при підвищенні напруги та помилкових спрацьовувань – при його зниженні.

Через складність фізичних явищ, пов'язаних із струмами витоку, відомі принципи, розроблені для апаратів захисту від струмів витоку, не повною мірою відповідають вимогам, що висуваються. У існуючих апаратах не здійснюється автоматичне підстроювання уставки спрацьовування, що призводить до збільшення максимально допустимого тривалого струму при двофазному замиканні та при коливаннях напруги контрольованої мережі. У

підземних мережах електропостачання в процесі експлуатації періодично змінюється протяжність ліній, що захищаються. Неконтрольовані зміни параметрів мереж, що захищаються, призводять до зниження ефективності засобів захисту. По суті, апарат захисту повинен мати адаптивні властивості до змінних характеристик мережі [5].

Для отримання уявлення про процеси, що протікають у мережі із ізольованою нейтраллю, а також отримання даних, необхідних для формування критеріїв алгоритму управління, розроблена найпростіша модель 3-фазної мережі з ізольованою нейтраллю напругою 380В у середовищі Matlab 7.01 (рис. 5) [11] .

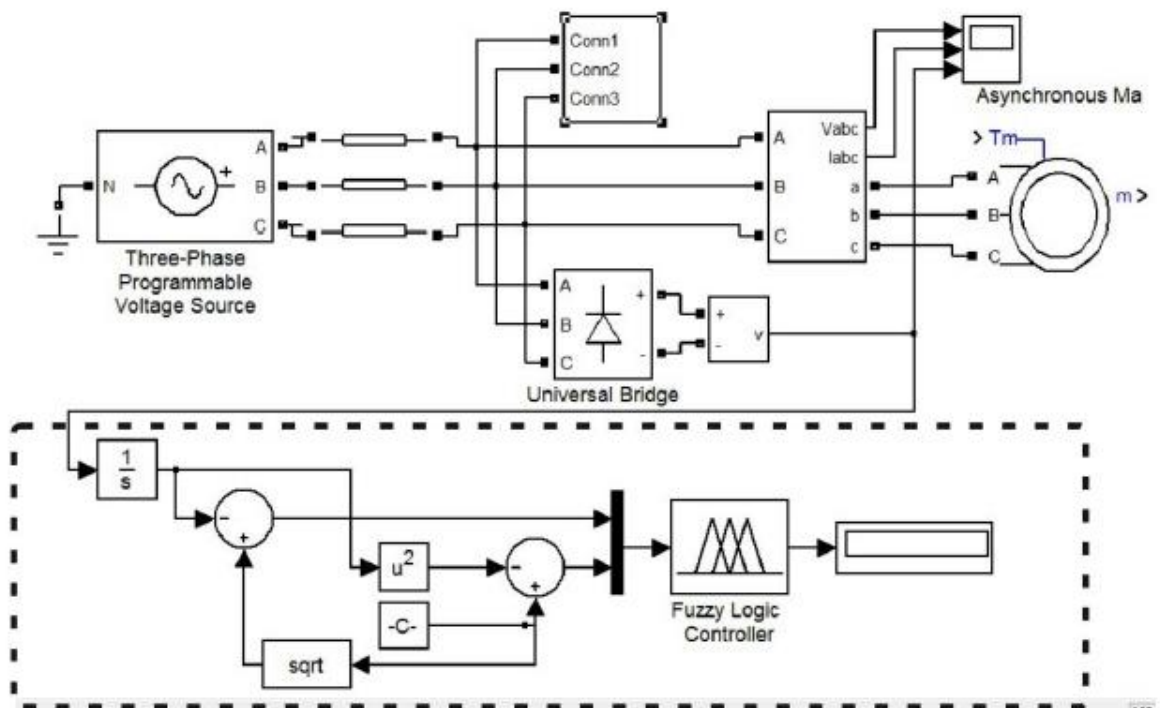


Рисунок 1.1 - Модель мережі із ізольованою нейтраллю

У моделі передбачені ступінчасті, лінійні та гармонічні зміни напруги. У ході імітаційних експериментів отримано дані про особливості процесів, що відбуваються на виході схеми бV що забезпечує високу швидкодію, при різних змінах напруги контрольованої мережі.

Для адаптивної системи налаштування уставки спрацьовування при змінах напруги контрольованої мережі необхідно встановити критерії, за якими відбуватиметься автоматичне налаштування.

Як критерії адаптивної настройки системи як правило використовуються лінійні інтегральні та квадратичні інтегральні критерії, спільне застосування яких дозволить реагувати на всі види зміни напруги контрольованої мережі та забезпечить високу завадостійкість захисту [3].

Висновки по першому розділу

Розроблений алгоритм адаптації може бути використаний для реалізації захисту електрообладнання, що містить частотно-регульовані електроприводи змінного струму, амплітуда зміни уставки може бути приведена у відповідність до діапазону зміни напруги перетворювача частоти.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

2.1 Моделювання пристроїв релейний захисту в графічному середовищі MATLAB SIMULINK

Інженерами по експлуатації і проектування енергосистем широко використовуються імітаційні моделі пристрою РЗА для вибору відповідних захистів для конкретних умов, для аналізу дій реле в робочих і аварійних режимах, а також для проведення своєчасних змін налаштувань і характеристик реле [4]. Виробники пристроїв захисту використовують імітаційні моделі для оптимізації і прискорення процесів розробки пристроїв РЗА. Програмні моделі можуть бути використані для навчання молодих фахівців і студентів. Такі моделі корисні розробникам і дослідникам для покращення наявних і розробки нових алгоритмів захистів.

Моделі цифрових пристроїв захисту можуть бути розділені на дві категорії. Моделі першої категорії враховують лише складові основної частоти струмів і напруги. Моделі, працюючі на базі векторних обчислень, що найбільш широко використовуються для проектування та розробки пристроїв РЗА. Моделі другої категорії враховують складові високих частот і загасаючих постійного струму, разом з складовими основної частоти струму і напруги мережі. Такі моделі називаються моделями, які враховують перехідні процеси [4].

Імітаційні моделі пристроїв захисту повинні якнайточніше відображати всі характеристики реальних пристроїв. Існують складності по побудові імітаційних моделей електромеханічних реле внаслідок неповноти інформації по їх проектування. Ситуація іде набагато краще в питанні проектування мікропроцесорних пристроїв захисту, найбільш широко використовуваних сьогодні. Більшість мікропроцесорних пристроїв РЗА супроводжуються технічною документацією і керівництвами по експлуатації, описують алгоритми їх роботи та характеристики пристроїв. На основі цієї інформації

можлива розробка досить точних імітаційних моделей, використовуючи мови програмування високого рівня Fortran , C, C++[] або пакети прикладного програмування як MATLAB SIMULINK [11].

У роботах, опублікованих в зарубіжних джерелах [5], обговорюються різні підходи щодо моделювання РЗА та аварійних режимів електромережі. Добре відомі пакети програмного забезпечення можуть бути використані для моделювання аварійних режимів електромережі, як для моделювання перехідних електромагнітних процесів [5,6], що так і встановилися режимів . Деякі прикладні програми дозволяють працювати з моделями релейного захисту, розробленими користувачами [4], в то час як інші програми містять встановлені в них базові моделі пристроїв РЗА [5].

Для реалізації поставленого завдання щодо розробки адаптивної системи захистів, в першу чергу необхідне створення адекватних докладних програмних моделей пристрою РЗА, а також моделей електричних мереж.

Інтерактивне середовище SIMULINK обране як програмне середовище оболонки для моделювання пристроїв РЗА і мережі з ізольовані нейтраллю. SIMULINK етографічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді спрямованих графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні, гібридні, нелінійні і розривні системи. Нижче наведено деякі фактори на користь вибору середовища SIMULINK, які входять в склад пакету MATLAB, в якості основного середовища моделювання [12]:

- зручні засоби побудови багаторівневих ієрархічних багатокомпонентних моделей;
- засоби інтеграції готових C/C++, FORTRAN, ADA і MATLAB-алгоритмів в модель, взаємодія з зовнішніми програмами для моделювання;
- сучасні засоби рішення диференціальних рівнянь для безперервних, дискретних, лінійних і нелінійних об'єктів (у т.ч. з гістерезисом та розривами);
- імітаційне моделювання нестационарних систем з допомогою

вирішувачів зі змінним і постійним кроком або методом керованого з MATLAB пакетного моделювання;

- зручна інтерактивна візуалізація вихідних сигналів, засоби налаштування та завдання вхідних впливів;
- повна інтеграція з MATLAB, включаючи чисельні методи, візуалізації, аналіз даних і графічні інтерфейси.

У склад SIMULINK входить велика безліч додаткових бібліотек, в том числі бібліотека SimPowerSystems, орієнтована на імітаційне моделювання електротехнічних пристроїв. Комбінуючи можливості Simulink та SimPowerSystems, можна не тільки імітувати роботу пристроїв в часовій області, але і виконувати різні види аналізу таких пристроїв.

Безперечною перевагою застосованої нами системи SimPowerSystems є те, що складні електротехнічні системи можна моделювати, поєднуючи методи імітаційного та структурного моделювання [8].

2.2 Модель електричної мережі з ізолюованою нейтраллю

Для аналізу особливостей режимів роботи захищеної електричної мережі з ізолюованою нейтраллю, які приводять пристрої захисту до неселективних спрацьовувань, була розроблена відповідна модель.

У зарубіжних джерелах присвячених розробці моделей мереж з ізолюованою нейтраллю, не наводяться докладні розрахункові параметри мережі [12,13].

На рисунку 9 представлена розроблена модель електричної мережі з ізолюованою нейтраллю на напруга 6кВ. Розроблена імітаційна модель мережі з ізолюовані нейтраллю дозволяє моделювати робочі та аварійні режими роботи мережі, а також контролювати параметри, що впливають на спрацювання пристроїв захисту [2]. З допомогою моделі можна:

- перевіряти правильність розрахунку уставок спрацьовування пристроїв захисту для конкретних умов експлуатації;
- виявляти режими, що призводять до селективних спрацювань пристроїв захисту;

— аналізувати поведінку пристроїв захисних в умовах експлуатації.

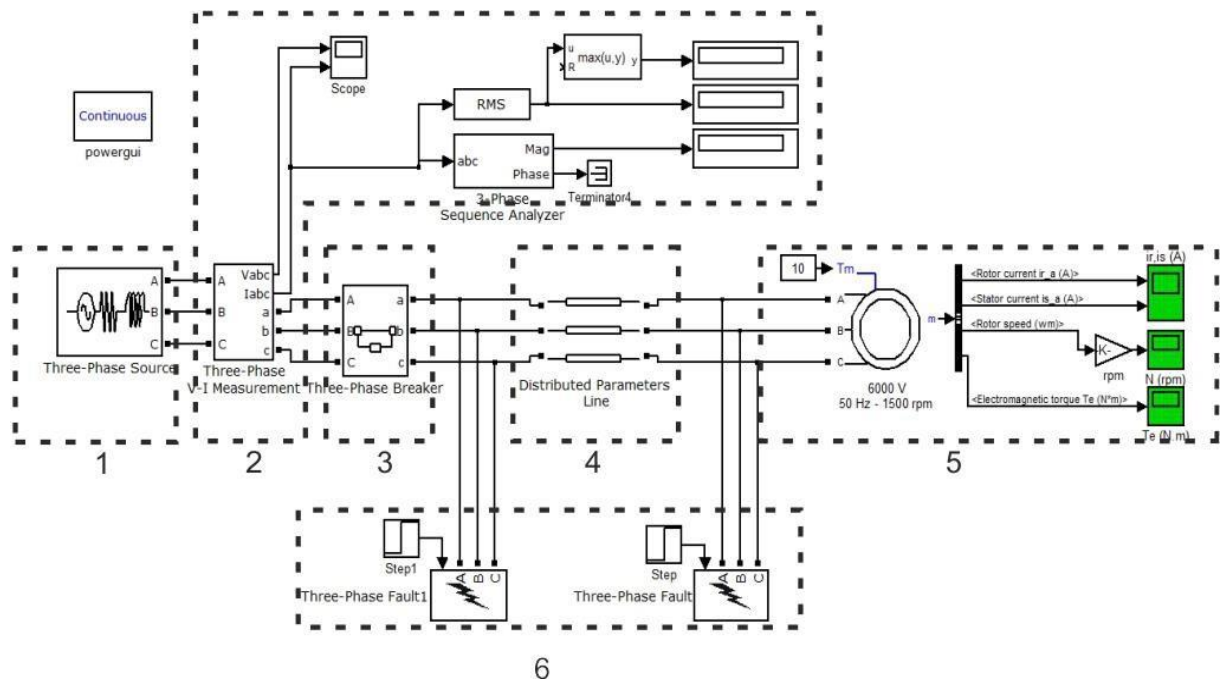


Рисунок 2.1 – Модель електричної мережі із ізольованою нейтраллю
Модель електричної мережі з ізольовані нейтраллю складається з

наступних головних компонентів:

- 1 - трифазне джерело електроенергії (Three-Phase Source);
- 2 - вимірювальний блок, що містить пристрої вимірювання симетричних складових струму (Three - Phase Sequence Analyzer), вимірник миттєвих значень струму та напруги мережі (Three-Phase VI Measurement), вимірювач діючого значення струму мережі (RMS), вимірювач максимальних значень пускових струмів і струмів короткого замикання (Max (u, y));
- 3 - високовольтний комутаційний пристрій (Three-Phase Breaker);
- 4- лінія електропередачі, параметри блоку розраховані з допомогою програми power_lineparam для дроти марки AC 185/24 довжиною 1км (Distributed Parameters Line);
- 5 - асинхронний електродвигун, параметри якого наведено в відповідність з характеристиками асинхронного двигуна ДАЗО4-400ХК-4(Asynchronous machine);
- 6 - трифазний пристрій, замикаючий фази між собою, а також на землю, встановлений в початку і в кінці захищуваної лінії (Three-Phase Fault).

Використовувані параметри лінії електропередачі наведено відповідність з параметрами повітряної лінії електропередачі, реалізованою проводом марки АС 185/24 [17] довжиною 1 км. Параметри розраховані за допомогою додатку програми power_lineparam програмного середовища SimPowerSystems. Параметри проводу і опори лінії електропередач, використані в розрахунках, а також вікнорозрахунку параметрів програми power_lineparam наведено в таблиці 2.1, таблиці 2.2 і на рисунку 2.2.

Таблиця 2.1 - Паспортні параметри дроти марки АС 185/24

Марка проводу	Число та діаметр проводів мм ²		Розрахунковий перетин мм ²			Розрахунковий діаметр, мм		Опір . постійному струму 20°C Ом/км
	Алюмін .	Стальн .	Алюмін .	Стальн .	Усього дротів	Стальне осердя	Провід	
АС 185/24	24 x 3,15	7 x 2,10	187	24,2	211,2	6,3	18,9	0,157

Таблиця 2.2 - Параметри опори лінії електропередач

Номинальна напруга, кВ	Відстань між фазами D , м	Довжина прольоту l , м	Висота опори H , м	Габарит лінії h , м
6-10	1	50-80	10	6-7

Параметри блоку Asynchronous machine наведено в відповідність з характеристиками асинхронного двигуна ДАЗО4-400ХК-4 [4], характеристики якого наведені в таблиці 2.4.

Джерело живлення Three-Phase Source з ізольованою нейтраллю, відповідає реальному джерелу живлення з параметрами наведеними в таблиці 2.3.

Параметри для моделі асинхронного двигуна були розраховані з допомогою S-file програми, написаною в програмному середовищі MATLAB [4]

Рисунок 2.2 - Вікно розрахунку параметрів лінії електропередач

Таблиця 2.3 - Параметри джерела живлення

Лінійна діюча напруга кВ	6кВ
Частота (Гц):	50 Гц
З'єднання	Y
Повна потужність (КВА)	2500кВА
Відношення X/R	7
Напруга короткого замикання $U_{кз}$ %	5,5%
Індуктивний опір Ом	0,792 Ом
Базова напруга	6кВ

Таблиця 2.4 - Паспортні дані асинхронного двигуна ДАЗО4-400ХК-4

Тип двигуна	P_n , кВт	U_n , У	f_1 , Гц	n_n , об/хв	P	η , %	$\cos \phi$	I_n , А	k_I	m_n	m_{max}	J, кг*м ²
ДАЗО4- 400ХК-4	315	6000	50	1500	2	93,7	0,86	37,6	5,0	1,3	2,8	11

Вікно програми для розрахунку параметрів моделі асинхронного двигуна представлено на рисунку 2,3.

```

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
%Справочные данные
1 PH=315e3; UH=600; f=50; n=1405; eff=0.937; cosfi=0.86;
2 IH=37.6; iK=7.0; mk=1.3; mmax=2.8; J=11; p=2;
3
4 %Расчет параметров
5 Uf=UH/1.73; n1=60*f/p; sn=(n1-n)/n1; sk=(mmax+sqrt(mmax^2-1));
6 w1=2*pi*f; w=pi*n/30; MH=PH/w;
7 for c=1:0.01:1.08;
8   Rr=(1.015*PH)/(3*IH^2*((1-sn)/sn));
9   Rs=((Uf*cosfi*(1-eff))/IH)-(Rr*c^2)-(0.015*PH/(3*IH^2));
10  LI=Uf/(2*w1*(1+c^2)*iK*IH);
11  Ls=Uf/(w1*IH*sqrt(1-cosfi^2)-(2*w1*mmax*MH*sn/p)/(3*Uf*sk));
12  Lm=Ls-LI;
13  c1=1+LI/Lm;
14  [Rs Rr LI Lm c c1]
15 end
script Ln 4 Col 20 OVR

```

Рисунок 2,3 – Лістинг програми для розрахунку параметрів схеми заміщення моделі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором

Проведено низку імітаційних експериментів роботи моделі асинхронного двигуна в номінальному режимі з розрахованими для нього параметрами схеми заміщення. Результати моделювання ідентичні один одному. На рисунку 2,4 наведено осцилограми (осцилограми результатів одного з імітаційних експериментів) чинного значення струму статора (A) і швидкості двигуна (об/хв).

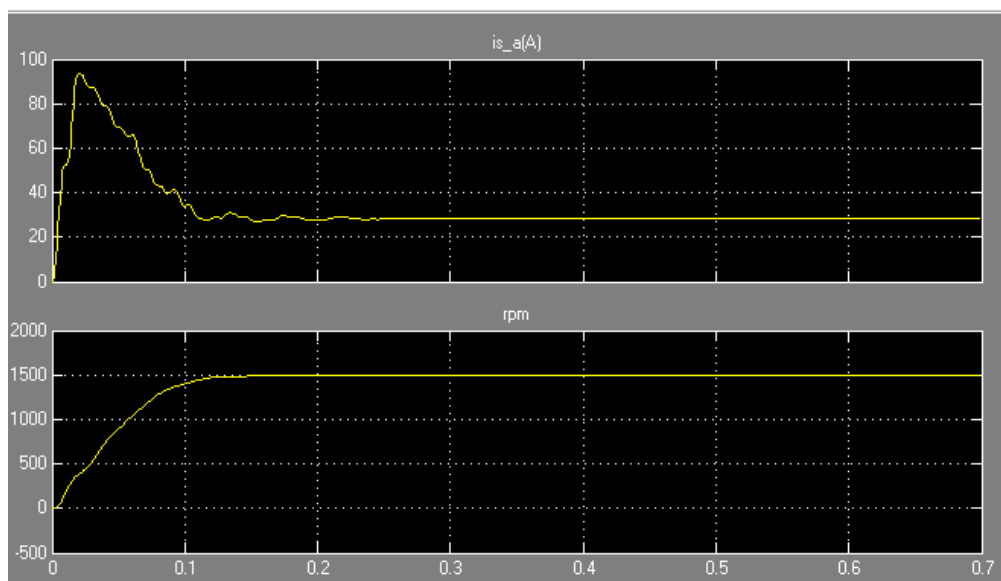


Рисунок 2.4. - Осцилограми діючого значення струму статора (А) та швидкості двигуна (об/хв)

Отримані за результатами моделювання значення номінального струму двигуна $I_H = 34$ А, а також значення швидкості двигуна 1470 об/м, відрізняються від паспортних даних на 10,5% і 4% відповідно, що достатньо для інженерних розрахунків. Значення пускових і номінальних струмів двигуна прийняті для розрахунку уставок МСЗ моделі пристрою струмових захистів, що розробляється.

2.3 Імітаційна модель пристрою струмових захистів

Для подальших досліджень прийнято узагальнену імітаційну модель пристроїв струмових захистів, оскільки струмові захисту є основою будь-якої системи РЗА [4]. Попередньо нами проведено аналіз принципів дії та структур сучасних цифрових пристроїв цифрових захистів, розроблених провідними зарубіжними фірмами Siemens, Merlin Gerin (Schneider Electric), Areva, Механотроніка [13,14].

Проведений аналіз принципів дії та структур сучасних цифрових пристроїв струмових захистів [2] типу МСО, МСЗ та ОЗЗ показав, що їх можна подати у вигляді узагальненої функціональної схеми, представленої на рисунку 2.5.

Аналогові входи струмів та напруги служать для введення сигналів від вимірювальних трансформаторів струму трансформаторів напруги та трансформаторів струму та напруги нульової послідовності. Для гальванічного поділу ланцюгів, а також зниження аналогових значень до необхідного рівня використовують проміжні трансформатори [2]. З аналогових входів значення струмів та напруги надходять у контур обробки аналогових значень, де відбувається фільтрація та аналогово-цифрове перетворення. Для фільтрації перешкод та спотворень найчастіше використовуються низькочастотні фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (KIX).

Дискретні входи призначені для введення логічної інформації (0/1), яка надалі використовується у програмній частині для ухвалення рішення.

Для введення інформації використовують зазвичай оптоелектронні перетворювачі. Ця інформація зазвичай включає:

- сигнали про стан елементів електричної системи (наприклад, допоміжні контакти вимикачів);
- сигнали від інших пристроїв РЗА;
- сигнали пуску (заборони) від пристроїв автоматичного повторного включення;
- сигнали прискорення захисту при включенні лінії;
- сигнали дозволу чи заборони окремих функцій захисту;
- сигнали управління, що змінюють логіку захисту [2].

Кожен дискретний вхід програмується певним чином. Тому поява або зникнення напруги на вході оптрона відповідає появі певної команди програмного блоку захисту.

Алгоритм захисту, який є частиною програмного забезпечення мікропроцесора, опрацьовує зібрану інформацію. В алгоритмі за допомогою методів обробки інформації обчислюються амплітуда, вектора та фазові кути зсуву напруги та струму. При необхідності обчислюється частота мережі, імпеданс ділянки, що захищається, та інші параметри. Обчислені значення записуються в оперативний записуючий пристрій (ОЗП), а потім порівнюються з встановленими уставками спрацьовування, записаними в енергонезалежний постійний пристрій (ПЗП) мікропроцесорного пристрою РЗА [2].

Якщо поточне значення струмів мережі перевищує уставку спрацьовування, спрацьовує таймер, що реалізує тимчасову затримку.

Затримка встановлюється відповідно до реалізованого виду захисту (МСО, МСЗ, ОЗЗ). Для МСО тимчасова затримка спрацьовування не передбачається тоді, як для МСЗ встановлюється тимчасова затримка залежно від розташування пристрою захисту джерела живлення. Після завершення

роботи таймера формується сигнал спрацьовування (або сигналізацію), який для локалізації пошкодженого приєднання передається за допомогою дискретних виходів пристрою захисту на керуючий вхід комутаційного пристрою.



Рисунок 2.5. – Узагальнена функціональна схема пристрою струмових захистів

Дискретні виходи та світлодіоди служать для цілей управління та сигналізації. Ці елементи програмуються, тобто. спрацьовування одного з реле відповідає виконанню пристроєм захисту певної функції.

У мікропроцесорному блоці поряд із вищезазначеними функціями захисту та формування команд управління комутаційним пристроєм, також реалізується реєстрація поточних та аварійних подій, забезпечення

функціонування операційної системи, наприклад, зберігання даних, годинник реального часу, комунікації та інтерфейси.

Комунікаційні інтерфейси можна умовно поділити на три частини:

- локальні засоби введення виведення даних;
- інтерфейси для обслуговування;
- системні інтерфейси.

Локальні засоби введення виведення даних, такі як дисплей та функціональні клавіші призначені для введення (зміни) та відображення наступної інформації: параметри захисту, функції захисту, стан та призначення дискретних входів-виходів, результати самодіагностики пристрою захисту [2].

Інтерфейс для обслуговування є послідовним портом на панелі пристрою для зв'язку з персональним комп'ютером.

Системні інтерфейси забезпечують зв'язок захисту із системою контролю та управління. За допомогою цих інтерфейсів в систему управління надсилається інформація про стан захисту та дії окремих функцій захисту. В іншому напрямку передаються сигнали, що дозволяють змінювати певні параметри або групи параметрів захисту [4].

Напруга живлення повинна бути постійною незалежно від пошкоджень в енергосистемі.

Спираючись на узагальнену функціональну схему пристроїв струмових захистів, нами розроблено відповідну модель. Імітаційна модель пристрою струмових захистів, розроблена за допомогою графічного середовища імітаційного моделювання SIMULINK та його бібліотекою SimPowerSystems, представлена на рисунку 2.6 [11].

Імітаційна модель пристрою струмових захистів складається з наступних компонентів: 1 – аналогові входи 3-х фазного змінного струму (Current); 2 – перетворювальна частина (ПЧ); 3 – уставки спрацьовування (блок Threshold); 4 – логічна частина (ЛЧ): 4.1 – МСО, 4.2 – МСЗ, 4.3 – ОЗЗ; 5 – сигнал на спрацьовування комутаційного пристрою.

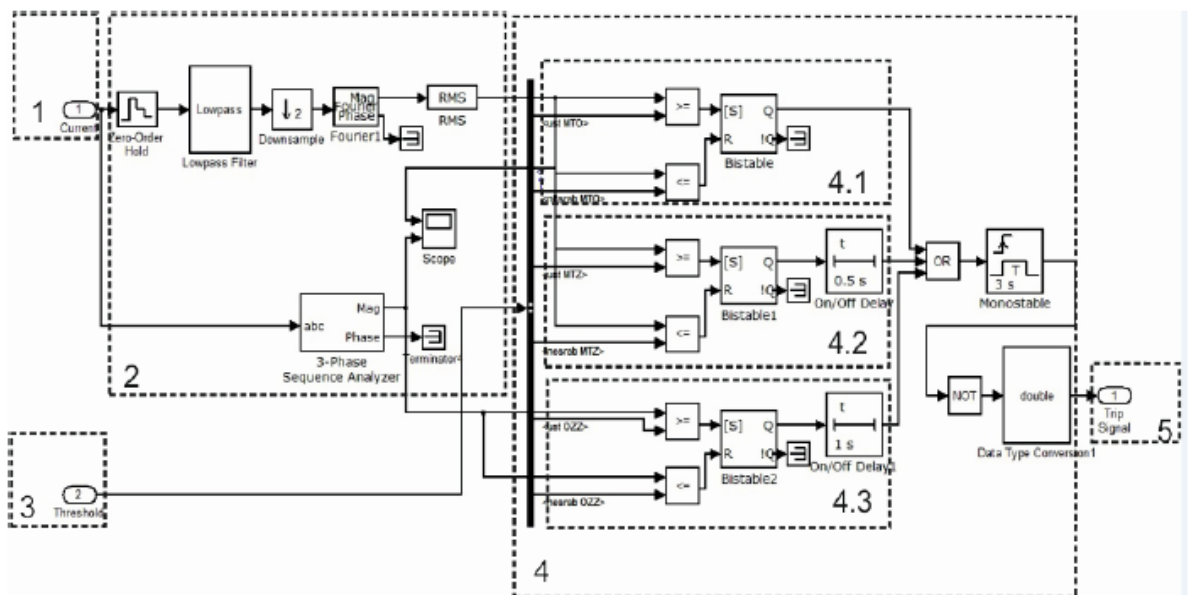


Рисунок 2.6 – Імітаційна модель пристрою струмових захистів

Алгоритм роботи представленої імітаційної моделі пояснює блок-схема на рисунку 2.7.

На вхід моделі пристрою струмових захистів надходять значення струмів фаз мережі раніше розробленої моделі мережі з ізольованою нейтраллю (1 – *Current*). У перетворювальній частині (2 - ПЧ) за допомогою блоку *Zero-Order Hold* здійснюється аналогово-цифрового входу 1.фрове перетворення сигналів, що надходять з ана

Для фільтрації перешкод та спотворень використовується фільтр низьких частот *Low-pass Filter*. Для одержання періодичної складової струму к.з. використовується блок *Fourier*. За допомогою блоку *Three-Phase Sequence Analyzer* вимірюються струми нульової послідовності. Логічна частина аналізатора пристрою захисту (4 - ЛЧ) реалізована за допомогою блоків порівняння та тригерів *Bistable*, тимчасова затримка виставляється у блоках *On/Off Delay*. Отримані значення струмів к.з. (MCO, MC3) і струмів нульової послідовності (O33), порівнюються зі уставками спрацьовування, що надходять з блоку завдання уставок спрацьовування (3 - *Threshold*). Блок *Monostable* призначений для запобігання зворотному включенню

комутаційного обладнання, що використовується в моделі мережі із ізольованою нейтраллю, в момент відновлення значення струму мережі до повернення реле, оскільки управління станом комутаційним обладнанням реалізовано за допомогою одного входу. Вихід пристрою струмових захистів видає керуючий сигнал комутаційний пристрій (5 - *TripSignal*) [11].

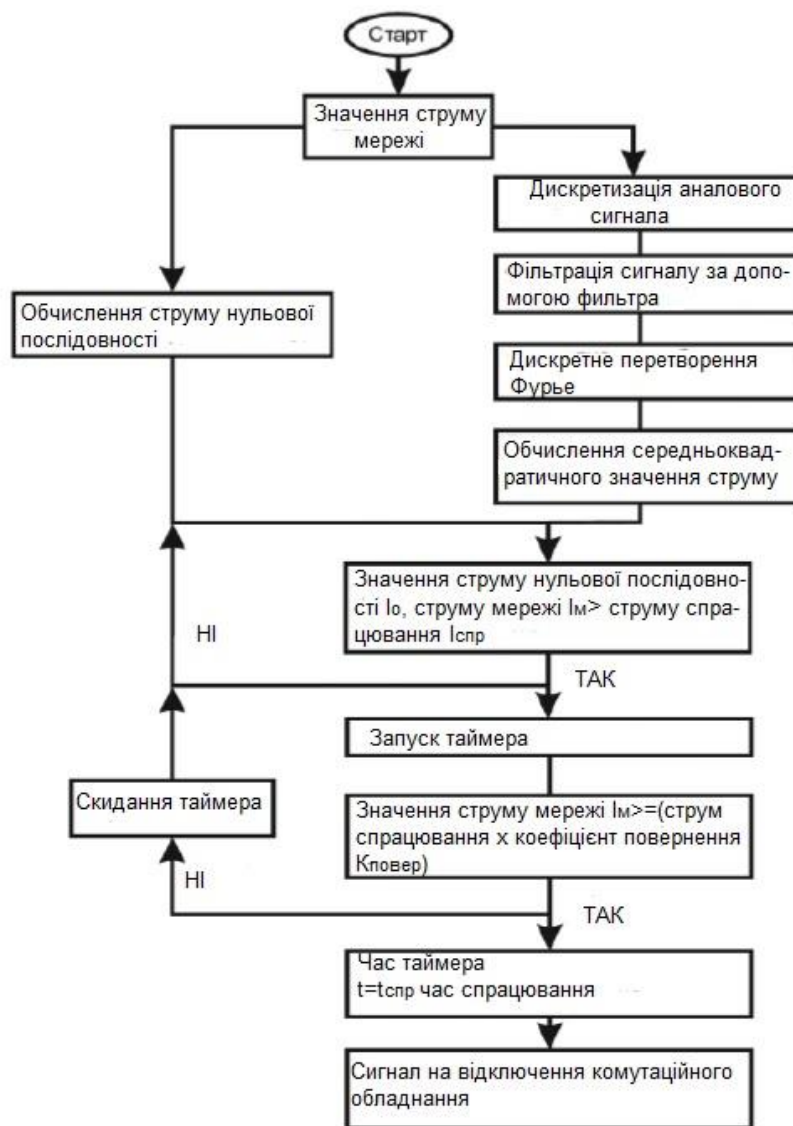


Рисунок 2.7 – Алгоритм роботи розробленої імітаційної моделі пристроїв захисту

Розроблена модель призначена для моделювання роботи пристроїв струмових захистів разом із розробленою у розділі 2.2 моделі мережі із ізольованою нейтраллю. Модель дозволяє задавати уставки спрацьовування, а також уставки повернення пристрою захисту, залежно від обраного

користувачем коефіцієнта повернення. Також можливе встановлення часу спрацьовування для кожного із захистів окремо. За замовчуванням дії захисту налаштовані на відключення комутаційного обладнання, але структура моделі пристрою захисту є наочною і зрозумілою, що дає можливість реалізації дії окремих або всіх захистів відразу на сигнал.

Висновки по другому розділу

Розроблена модель дозволяє інтегрувати її як функціональний блок у розроблену раніше модель мережі з ізольованою нейтраллю.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ УНІВЕРСАЛЬНОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА АЛГОРИТМІВ ЇЇ РОБОТИ ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЗАХИСТУ

3.1 Моделювання аварійних режимів при змінних параметрах контрольованої мережі

Ряд імітаційних експериментів щодо моделювання аварійних режимів роботи енергосистеми проведено при коливаннях напруги мережі в інтервалі від -10% до +10%. Експерименти проведені з використанням розроблених моделей мережі з ізольованою нейтраллю та влаштування струмових захистів. Результати моделювання ідентичні один одному. При моделюванні використані параметри пристрою захисту та параметри мережі аналогічно імітаційному моделюванню з оцінки адекватності розроблених моделей у другому розділі.

На рисунку 3.1 наведено осцилограми струмів та напруги мережі при трифазному металевому КЗ (перехідний опір у місці КЗ дорівнює нулю), і при зниженні напруги мережі на – 10 %.

Як видно з осцилограми, при зниженні напруги мережі на (-)10%, струм трифазного КЗ нижче уставки спрацьовування МСО, внаслідок чого спрацьовує МСЗ з тимчасовою затримкою в 0,3 секунди, що є другим ступенем струмових захистів. При цьому значення струму спрацьовування перевищує допустимі значення нагріву провідників та електроустановок, що вимагає спрацьовування пристроїв захисту без тимчасових затримок.

На рисунку 3.2 представлена осцилограма (осцилограми одного з імітаційних експериментів) струмів та напруги мережі при двофазному замиканні через перехідний опір 10 Ом при зниженні напруги мережі – 10 %.

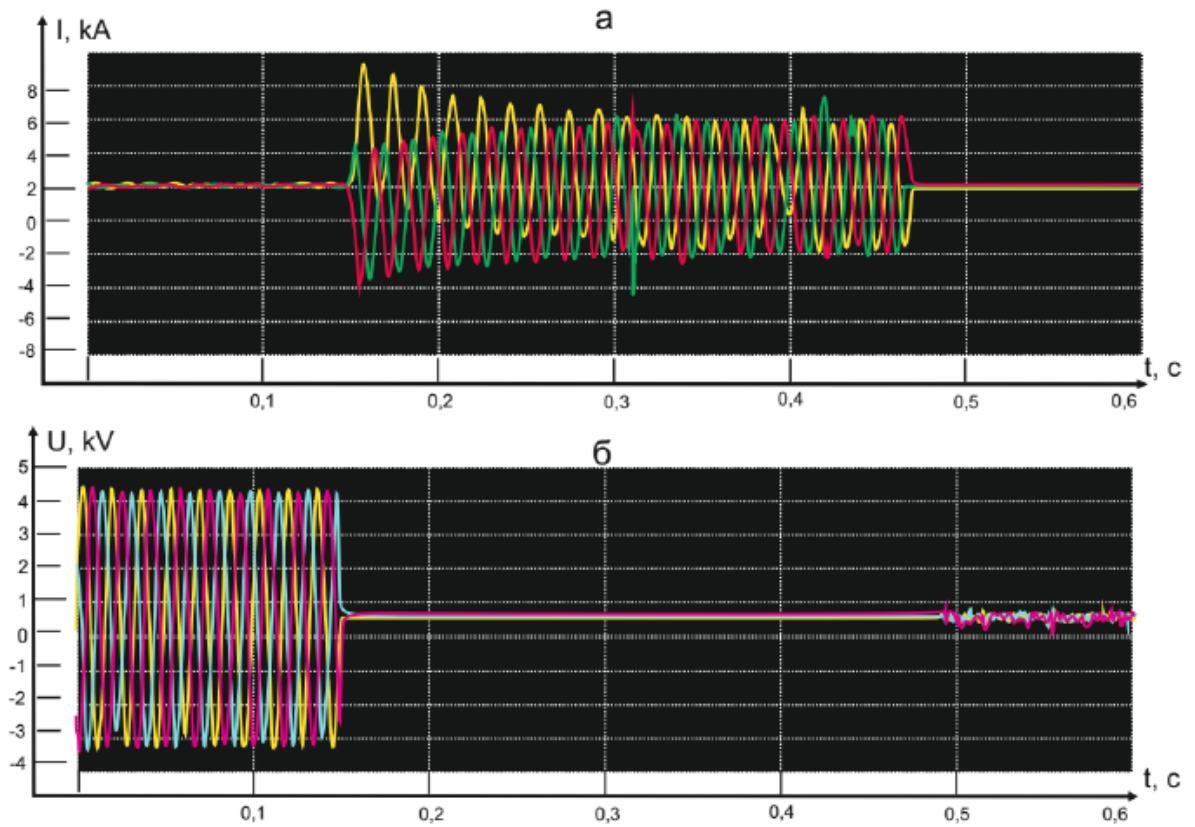


Рисунок 3.1 – Приклад осцилограми струмів (а) та напруги мережі в момент трифазного металевого КЗ (б), при зниженні напруги мережі – 10 %.

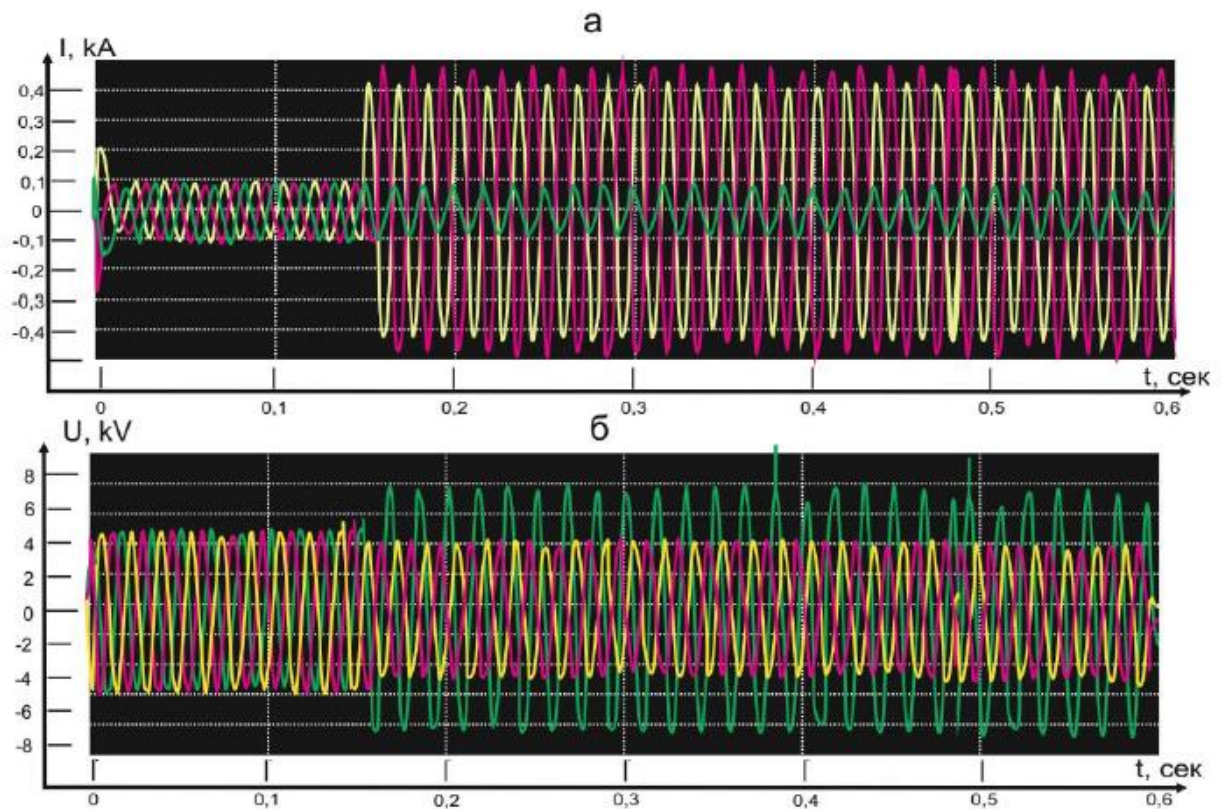


Рисунок 3.2 – Приклад осцилограми струмів (а) та напруги мережі (б) у момент двофазного замикання через перехідний опір 10 Ом при зниженні напруги мережі на (-) 10%

Згідно з отриманою осцилограмою, при зниженні напруги мережі на - 10% в момент двофазного замикання фаз через перехідний опір 10 Ом, струми КЗ менше уставки спрацьовування МСЗ, що призведе до неспрацьовування пристрою захисту даного приєднання. У розподільчих мережах подібна ситуація призведе до неселективного спрацьовування пристрою захисту нижчестоящего приєднання, що не локалізує місце пошкодження, і призведе до неприпустимого перегріву провідників та електроустаткування.

Для запобігання подібним ситуаціям може використовуватися ще один ступінь МСЗ з більшою тимчасовою затримкою, проте, внаслідок великої тимчасової затримки можливі пошкодження ізоляції провідників та вихід з ладу обладнання.

Результати моделювання однофазних замикань на землю при напрузі мережі на – 10 % менше від номінального, аналогічні результатам, отриманим при моделюванні двофазних замикань через перехідний опір 10 Ом при напрузі мережі на – 10 % менше від номінального.

Результати моделювання трифазного, двофазного, а також замикань однієї фази на землю, при підвищенні напруги мережі на +10% вище від номінального показують, що струм спрацьовування перевищує уставку спрацьовування. Це може призвести до спрацювання пристрою захисту вищого приєднання з більшою уставкою спрацьовування, що відключає від джерела живлення не пошкоджене приєднання.

Проведено імітаційні експерименти спрацьовування захистів МСО, МСЗ і ОЗЗ при напругах мережі, що змінюються, на $\pm 10\%$, що відповідає реальним умовам експлуатації в гірничорудній промисловості. Встановлено, що при зниженні напруги мережі при аварійних режимах роботи (трьохфазне, двофазне та однофазне замикання на землю) спрацьовують захисти нижчого

ступеня або пристрої захисту нижчого приєднання, що обумовлено зниженням струмів спрацьовування нижче уставки спрацьовування. При аварійних режимах в момент підвищення напруги мережі спрацьовують захисти вищого ступеня або пристрої захисту вищого приєднання, що обумовлено підвищенням струму спрацьовування вище за уставку спрацьовування.

Отримані результати свідчать про необхідність розробки адаптивних до змінних режимів роботи та експлуатаційних параметрів мережі пристроїв захисту [16].

3.2 Визначення принципів роботи універсальної системи адаптивного підлаштування

Сучасні пристрої захисту енергосистеми працюють за розрахованими для номінальних умов характеристиками та уставками спрацьовування.

Розвиток мікропроцесорних пристроїв захисту дозволяють інтегрувати системи захисту з пристроями збору даних та обробки інформації для адаптації уставок і характеристик спрацьовування до змінних експлуатаційних і режимних параметрів мережі в реальному часі.

Уставки спрацьовування більшості пристроїв захисту енергосистеми повинні бути адаптивними до змін наступних параметрів енергосистеми [16]:

- 1) напруга енергосистеми,
- 2) номінальний струм навантаження,
- 3) довжина контрольованої ділянки,
- 4) питомий опір провідників лінії електропередач,
- 5) до типу навантаження (індуктивне або ємнісне).

Для контролю вищеперелічених параметрів доцільно використовувати інформацію, одержувану з вимірювальних трансформаторів струму, трансформаторів напруги і трансформаторів нульової послідовності, які є найчастіше використовуваними елементами вимірювальних частин пристроїв релейного захисту.

В якості вхідних сигналів системи адаптації можуть використовуватися значення, що надходять у вимірювальну частину пристрою релейного захисту з первинних перетворювачів параметрів мережі. Вихідний сигнал системи адаптації може передаватися пристроям захисту через системні інтерфейси, що широко використовуються в сучасних мікропроцесорних пристроях захисту та автоматики.

На рисунку 3.3 представлена схема, що пояснює принцип роботи системи адаптації. Отримуючи сигнали від трансформаторів напруги та трансформаторів струму, система адаптації фіксує зміни параметрів мережі, формує сигнал коригування уставки спрацьовування, який передається через системний інтерфейс мікропроцесорний пристрій захисту.

Для визначення принципів роботи універсальної системи адаптації уставок спрацьовування струмових захистів, необхідно визначити залежність параметрів, що визначають струми спрацьовування захистів від змінних параметрів мережі.

Система адаптації уставок спрацьовування, що розробляється, призначена для наступних видів струмових захистів: максимальний струмовий відсікання (МСС), максимальний струмовий захист (МСЗ) та захист від однофазного замикання на землю (ОЗЗ). Контрольований параметр для адаптації вставок і характеристик захисту вибрано змінну напругу мережі.

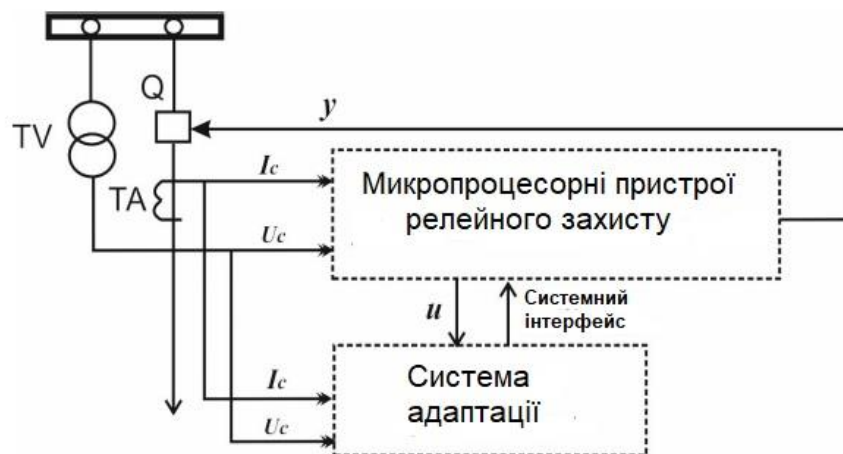


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи адаптації

Струм спрацьовування МСЗ визначається виразом (3.1) [3], в якому добуток робочого струму навантаження та коефіцієнта самозапуску дорівнює струму самозапуску $I_{с.з.д.}$:

$$I_{с.з.д.} = I_{роб.макс} \cdot k_{СЕП} = \frac{U}{\sqrt{3} \sum x}, \quad (3.1)$$

де U – розрахункова лінійна напруга, $\sum x$ сумарний пусковий індуктивний опір електродвигуна і живлячих їх ліній і трансформаторів. Опір електродвигуна при пуску визначається за виразом (3.2) [5]:

$$x_{сз} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{II}} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном} \cdot k}, \quad (3.2)$$

де $U_{ном}$ - номінальна напруга електродвигуна, В; $I_{ном}$ номінальний струм, А.

З формули видно, що струм максимального навантаження прямо пропорційний напрузі мережі.

Вираз, який визначає струм спрацьовування МСЗ прийме наступний вигляд (3.3):

$$I_{сз} = \frac{U \cdot k_{II}}{k_g \cdot \sqrt{3} \cdot \sum x}. \quad (3.3)$$

При змінах напруги мережі змінюється значення струмів максимального навантаження, при цьому повинна змінюватися уставка МСЗ.

Струм спрацьовування МСС визначається струмами трифазного короткого замикання, прямо пропорційно залежними від напруги мережі (3.4) [3]:

$$I_{сз} = \frac{U \cdot k_{від}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \quad (3.4)$$

де $k_{від}$ - коефіцієнт відбудови рівний 1,1-1,2 для цифрових пристроїв релейного захисту.

При змінах напруги мережі змінюється значення струмів трифазного короткого замикання, при цьому повинна змінюватися уставка спрацьовування МСС.

Струми спрацьовування ОЗЗ в мережах з ізольованою нейтраллю визначаються ємнісними струмами мережі (3.5):

$$I_{c3} = -\frac{3E_A}{X_C} = -\frac{j3U_{A\phi}}{X_C}. \quad (3.5)$$

Таким чином, струм I_{c3} дорівнює ранковому значенню нормального ємнісного струму фази $\underline{I}_{\phi(C)} = U_{\phi} / X_C$.

Місткі струми мережі прямо пропорційно залежать від напруги мережі. При змінах напруги мережі змінюються значення ємнісних струмів мережі, при цьому має змінюватися і уставлення спрацьовування ОЗЗ.

Так як залежність уставок спрацьовування струмових захистів (МСЗ, МСС, ОЗЗ) від змінюючої напруги мережі має загальний (пропорційний) характер, розроблено універсальна система адаптації уставок і характеристик спрацьовування для струмових захистів [5].

3.3 Система адаптації струмових захистів

Для адаптації уставок струмових захистів, уставки, певні для номінальних параметрів мережі повинні множитися на пропорційний коефіцієнт, який характеризує ступінь зміни напруги. При цьому повинні бути виключено короточасні і незначні зміни напруги, що не впливають на селективність роботи пристроїв захисту. Для цього повинен бути визначено діапазон нечутливості системи адаптації, який залежить від конкретних умов конфігурації та структури мережі. До наприклад, у мережах з ділянками, що складаються з повітряних ліній завдовжки 2 км і більше, діапазон нечутливості повинен бути не менше 7%, що пов'язано з значною різницею струмів спрацьовувань між суміжними захищеними ділянками. У кабельних ж мережах з невеликими по протяжності ділянками, що захищаються, діапазон нечутливості повинен бути не більше 5%. Час дії системи адаптації має бути досить швидким, своєчасного реагування на зміни напруги мережі.

Алгоритм роботи системи адаптації представлений на рисунку 3.4. Поступаючі у систему адаптації, діючі значення напруги мережі проходять дискретне перетворення Фур'є та обчислення середньоквадратичних значень. Наступним етапом алгоритму обчислюється відношення поточної напруги мережі до номінальної напруги, яке використовується для розрахунків

уставок струмових захистів при номінальних параметрах мережі. У випадку якщо пропорційний коефіцієнт, що обчислюється в системі, не потрапляє в діапазон неспрацьовування (за замовчуванням прийнято значення $\pm 5\%$), він множиться на розраховані для номінальних параметрів значення уставок спрацьовування. Також формуються уставки для стійкого неспрацьовування захистів, обумовлені коефіцієнтом повернення пристрої релейний захисту.

Незважаючи на загальне визнання необхідності розробки адаптивних пристроїв захистів, як показує аналіз літературних джерел, питанням їх розробки та моделювання не приділено належної уваги. У зарубіжних джерелах можна зустріти невелику кількість робіт, присвячених адаптивним струмовим захистам і працюючим в мережах з розподіленою генерацією [17], принцип яких заснований на моніторингу стану режимів роботи споживачів та джерел розподіленої генерації. Водночас практично не існують роботи присвячені адаптації струмових захистів від змінних параметрів мережі.

Розроблена в середовищі імітаційного моделювання SIMULINK/MATLAB, модель системи адаптації уставок спрацьовування струмових захистів представлена на рисунку 3.5.

Розроблена модель системи адаптації, призначена для використання спільно з розробленою раніше імітаційною моделлю пристроїв струмових захистів. Модель розроблено в відповідності до певних критеріїв її функціонування та алгоритмом роботи. Модель формує набір адаптивних уставок спрацьовувань в залежності від зміни напруги мережі [2]. У моделі задаються наступні параметри:

- номінальна напруга мережі;
- розрахована для номінальних значень уставка спрацьовування МСС;
- розрахована для номінальних значень уставка спрацьовування МСЗ;
- розрахована для номінальних значень уставка спрацьовування ОЗЗ;
- коефіцієнт повернення k_B ;
- діапазон нечутливості.

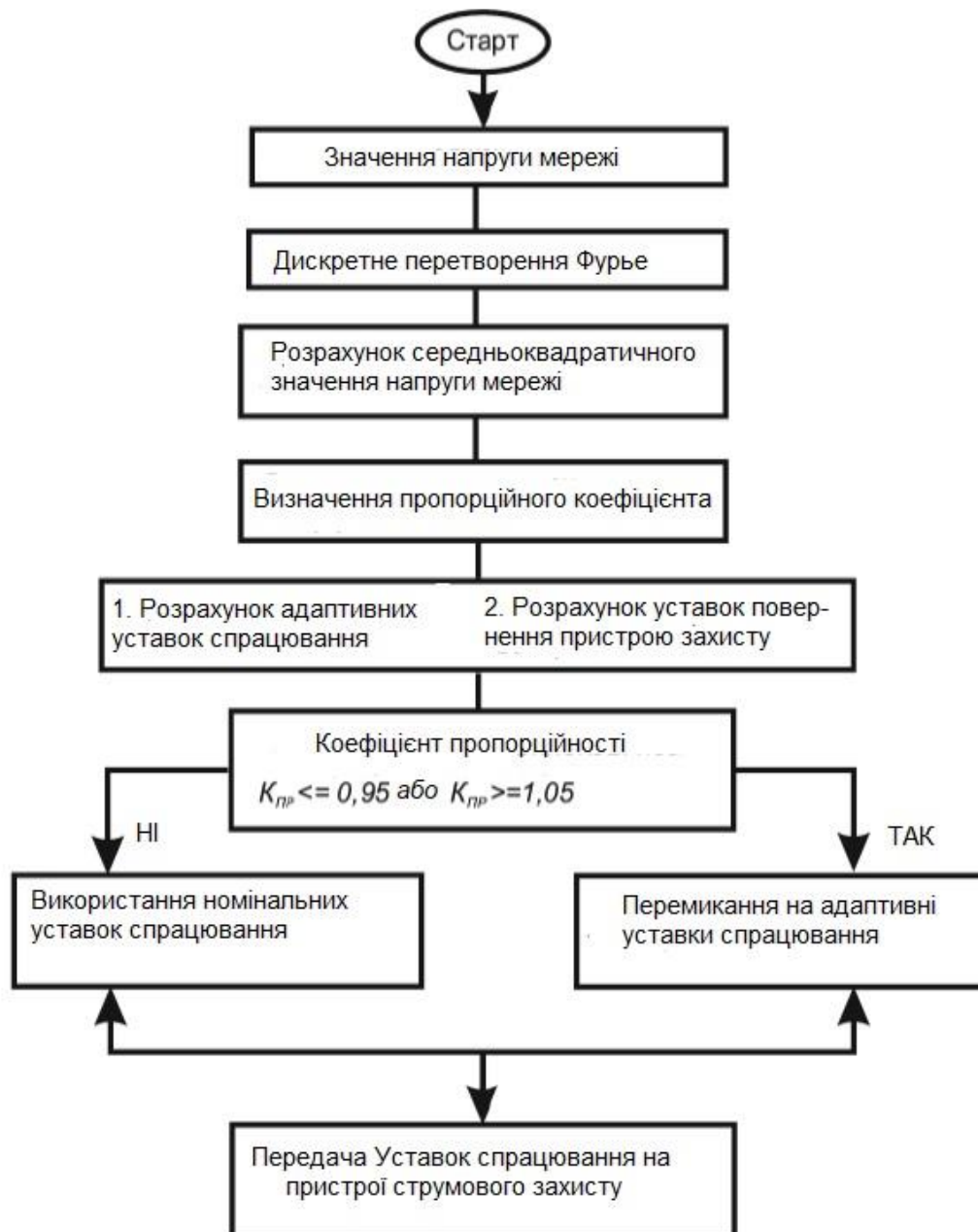


Рисунок 3.4 - Алгоритм роботи системи адаптації уставок струмових захистів

Діапазон нечутливості задається в блоці Switch . Встановивши велике значення діапазону нечутливості можна вимкнути перемикання на адаптивні уставки спрацьовування. Коефіцієнт повернення КП вибирається в залежності від типу застосовуваного пристрої захистів. Для більшості мікропроцесорних терміналів [11] значення коефіцієнта повернення варіюється від 0,9 до 0,95.

Розроблена модель дозволяє інтегрувати її в якості функціонального блоку в розроблену раніше модель мережі з ізольованою нейтраллю.

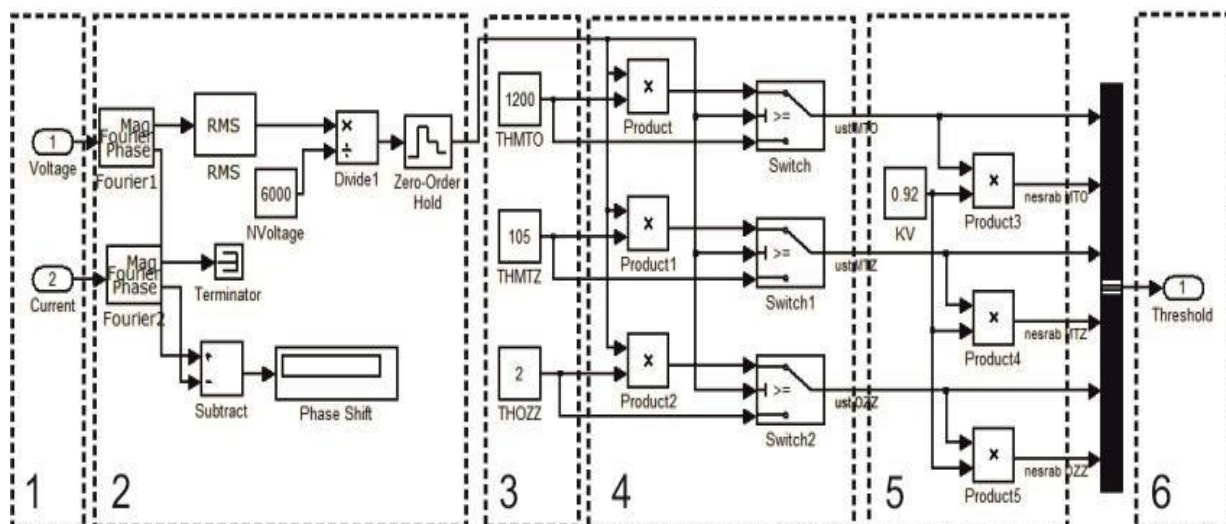


Рисунок 3.5 – Модель системи адаптації уставок спрацьовування струмових захистів: 1 -Введення аналогових значень струму і напруги контрольованого об'єкта; 2 - блок обчислення пропорційного коефіцієнта; 3 - блок завдання номінальних уставок спрацьовування; 4 - блок перемикавання номінальних уставок спрацьовувань на адаптивні, блок враховує заданий користувачем діапазон не спрацьовування; 5 - блок завдання коефіцієнта повернення і формування значень уставок стійкого неспрацьовування пристроїв захисту; 6 - блок передачі уставок спрацьовування пристроям захисту

3.4 Моделювання роботи системи адаптації уставок спрацьовування

Були проведені імітаційні експерименти з оцінки роботи системи. адаптації уставок спрацьовування та характеристик струмових захистів, в умовах коливання напруги мережі.

Модель мережі із ізольованою нейтраллю, з інтегрованими моделями пристрої струмових захистів та системи адаптації уставок спрацьовування струмових захистів представлена на рисунку 3.6. Модель пристроїв струмових захистів представлена як функціональний блок Overcurrent Relay Protection Unit, а модель системи адаптації уставок спрацьовування

струмових захистів представлена в якості функціонального блоку Settings Adaptation System.

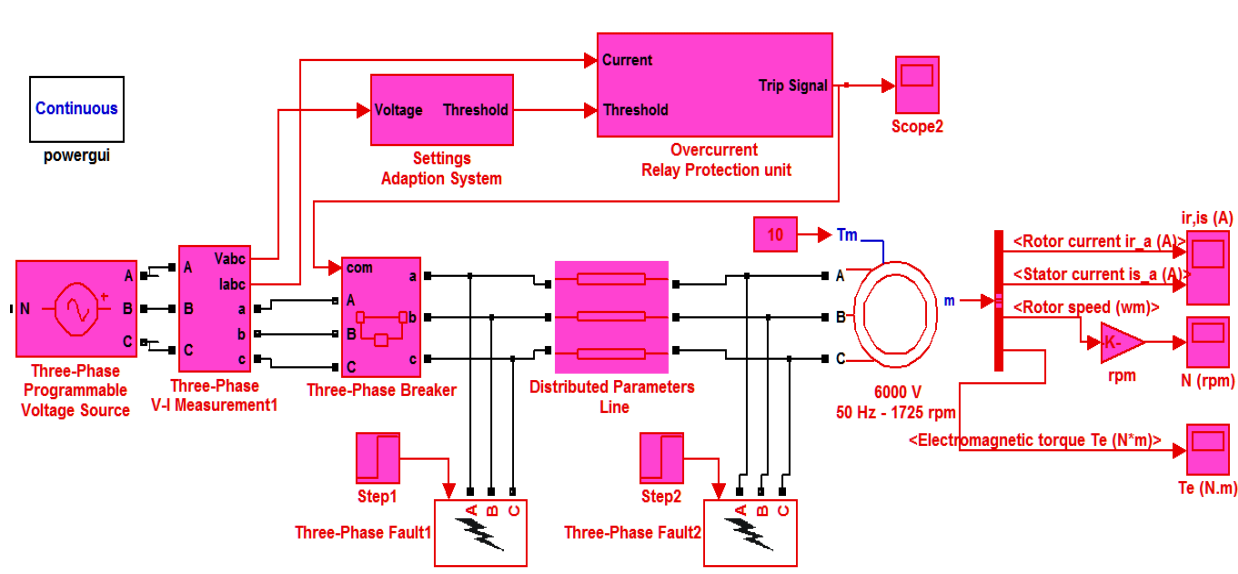


Рисунок 3.6 – Модель мережі із ізольованою нейтраллю з інтегрованими моделями пристроїв струмових захистів і системи адаптації уставок спрацьовування струмових захистів

Моделювання було проведено для двох імітованих умов:

1. Моделювання роботи струмового захисту при трифазному металевому короткому замиканні, без системи адаптації;
2. Моделювання роботи струмового захисту при трифазному металевому короткому замикання, з активною системою адаптації.

Імітаційні експерименти по моделювання аварійних режимів роботи енергосистеми проведені при ступінчастій зміні напруги мережі на 15%. Експерименти проведено з використанням розроблених моделей мережі з ізольовані нейтраллю, пристрої струмових захистів і системи адаптації уставок спрацьовування. При моделюванні використано параметри пристроїв захистів і параметри мережі аналогічно імітаційному моделювання по оцінки адекватності розроблених моделей у 2 розділі.

На рисунку 3.7 представлені результати моделювання для першої імітаційного умови. на верхньому графіку представлена лінійна напруга мережі, яка змінюється східчасто на 15%. на нижньому графіку представлена уставка MCC [4].

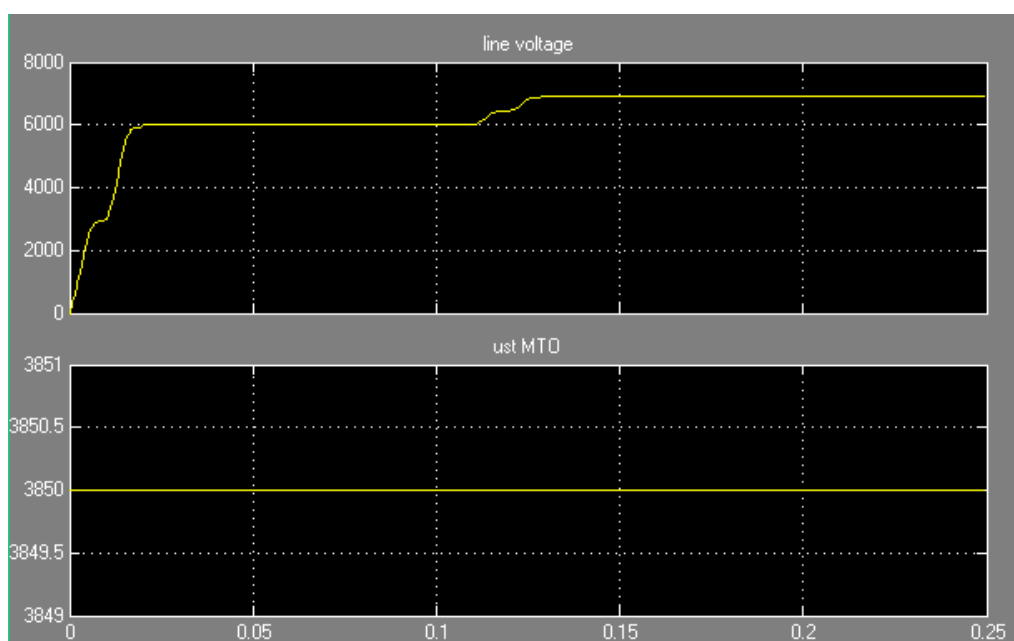


Рисунок 3.7 – Осцилограми лінійної напруги мережі та уставки МСВ при коливаннях напруги +15%

Зміна напруги мережі відбувається на 0,11 сек моделювання, через реактивного складника мережі значення напруги досягає встановленого значення через 0,02 сек. У такій ситуації значення трифазного струму короткого замикання збільшаться пропорційно зміни напруги, у той час як уставка спрацьовування МСС залишилася колишньою, що призведе до спрацювання захистів при коротких замиканнях на вищестоящих захищаються ділянках.

На рисунку 3.8 показано зміну лінійної напруги мережі та уставки МСС при коливанні напруги мережі з активною системою адаптації уставок спрацьовування. Напруга мережі вимірюється системою адаптації уставок. При цьому, як видно на рисунку, уставка спрацьовування МСС збільшується 3820А до 4400А. Адаптація уставок спрацьовування відбувається із запізненням у 0.1 сек, що обумовлено дією блоку ZeroOrderHold (рисунк 3.5), що виконує дискретизацію вхідного сигналу по часу. Нове значення уставки спрацьовування обчислено з допомогою коефіцієнта пропорційності, який показує ступінь зміни напруги мережі. Нова уставка забезпечує правильне функціонування пристрої захисту.

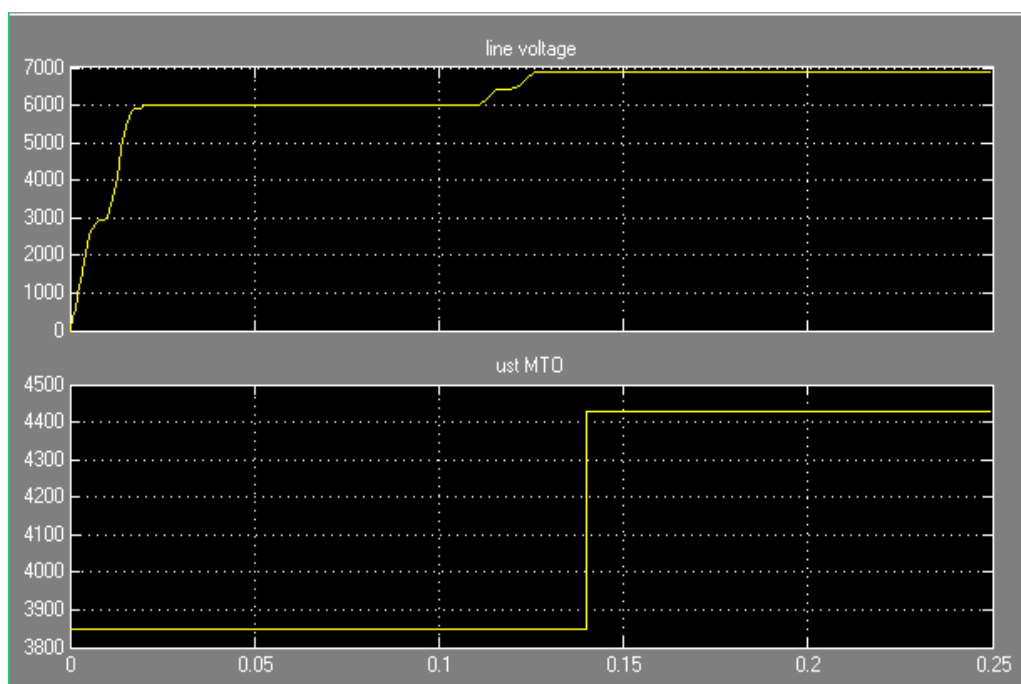


Рисунок 25 – Осцилограми лінійної напруги мережі та уставки МСС при коливаннях напруги +15% з активованою системою адаптації уставок спрацьовування.

Висновки по третьому розділу

На основі наведених результатів моделювання аварійних режимів роботи моделі мережі з ізольовані нейтраллю, при коливаннях напруги 10%, що відповідає реальним умовам експлуатації в промисловості, можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що при зниженні напруги мережі в аварійних режимах роботи (трифазне, двофазне та однофазне замикання на землю) спрацьовують захисту нижчестоячого щабеля або пристрої захистів нижчестоячого приєднання. При аварійних режимах в момент підвищення напруги мережі спрацьовують захисту вищестоячого щабеля або пристрої захистів вищого приєднання.

2. Визначено залежності параметрів, визначальних уставок спрацьовування струмових захистів як функції зміни напруги мережі.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці і дослідженню ефективних методів підвищення надійності і селективності пристроїв релейний захист. У роботі виконано докладний аналіз проблеми створення адаптивних систем струмових захистів і вирішена актуальна проблема створення методології і принципів побудови універсальних адаптивних до змінним параметрам мережі пристроїв струмових захистів.

У результаті виконаних досліджень отримані наступні основні результати:

1. Встановлено, що експлуатаційні параметри та режими роботи мереж надають суттєве вплив на селективність спрацьовування пристроїв РЗА. Так, внаслідок невеликої різниці сумарного індуктивного опору між попередньою і наступною ділянкою, в кабельних розподільних мережах, коливання напруги мережі як у допустимих за стандартів значення, так і в реальних умовах експлуатації приводять до неселективних і хибних спрацьовувань струмових захистів.

2. Встановлено, що в розподільчих мережах з розподіленою генерацією зміни режимів роботи джерел та зміни схеми живлення призводять до помилкових спрацьовувань та порушення узгодженості дій пристроїв РЗА. Схожа ситуація спостерігається і в розподільчих мережах з резервованою схемою електропостачання, а також на розподільчих підстанціях з секціонованою системою шин.

3. Розроблено моделі мережі з ізолюваною нейтраллю та пристрої струмових захистів. Елементи моделі мережі з ізолюваною нейтраллю відповідають електричним параметрам реальних компонентів енергосистеми, таких як джерело енергії, лінія електропередачі, асинхронний електродвигун. Модель струмових захистів дозволяє ставити струмові та тимчасові уставки спрацьовування, а також коефіцієнта повернення. Комплексне використання розроблених моделей може бути корисно проектантам та спеціалістам з експлуатації РЗА для перевірки розрахованих для пристроїв захисту уставок і характеристик спрацьовувань, а також для виявлення режимів, приводять до

неправильним діям пристроїв захисту. Проведено імітаційні експерименти, підтверджуючі достовірність розроблених моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
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. Яндульський О.С., Дмитренко О.О. 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.
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. 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