

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Карпенко Григорій Володимирович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування можливості використання алгоритмічного моделювання для
селекції пошкодження фаз лінії електропередачі
(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

Карпенко Г. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Карпенко Г. В. Обґрунтування можливості використання алгоритмічного моделювання для селекції пошкодження фаз лінії електропередачі.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Основною метою кваліфікаційної роботи є узагальнення теоретичних положень методу алгоритмічних моделей, розробка на цій основі алгоритмів роботи релейного захисту енергооб'єктів, в першу чергу ліній електропередачі.

Ключові слова: алгоритмічна модель, електрична мережа, релейний захист.

ABSTRACT

Karpenko G. V. Substantiation of the possibility of using algorithmic modeling for the selection of phase damage of a power transmission line.

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Pollessia National University, Zhytomyr, 2025.

The main purpose of the qualification work is to generalize the theoretical provisions of the method of algorithmic models, to develop on this basis algorithms for the operation of relay protection of energy facilities, primarily power transmission lines.

Keywords: algorithmic model, electric network, relay protection.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ СИСТЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	6
1.1 Особливості розвитку технічних рішень захисту та автоматики ліній електропередачі	6
1.2 Постановка інформаційних завдань та методологічна основа захисту та автоматики ліній електропередач	12
Висновки по розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ	22
2.1 Концепція розпізнавання методу	22
2.2 Типи алгоритмічних моделей	24
2.3 Інструмент годографів	27
Висновки по розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ З УНІФІКОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	33
Висновки по розділу 3	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

ВСТУП

Основи більшості алгоритмів релейного захисту були закладені в той час, коли розробників помітно обмежувала існуюча елементна база. На даний час з'явилася можливість повною мірою, ніж раніше, використовувати інформацію про режим, що існував до короткого замикання, та реалізовувати ефективні алгоритми роботи, здатні враховувати велику інформацію про параметри та структуру енергооб'єкта. Одним із перспективних інструментів розвитку алгоритмічної бази стало її побудова на основі алгоритмічних моделей енергооб'єктів. Об'єднуючи апіорну інформацію про структуру та параметри енергооб'єкта з результатами його спостереження, метод алгоритмічних моделей дозволяє підвищити чутливість захистів при гарантуванні селективності. До числа задач методу алгоритмічних моделей належить також уніфікація характеристик релейного захисту.

Назріла необхідність в узагальненні теоретичних положень, що складають основу методу алгоритмічних моделей, а також досвіду його практичного застосування, зокрема, для вирішення задач уніфікації характеристик спрацювання дистанційного захисту, селекції пошкоджених фаз, визначення місця пошкодження лінії електропередачі, побудови захисту далекого резервування.

Метою роботи є узагальнення теоретичних положень методу алгоритмічних моделей, розробка на цій основі алгоритмів роботи релейного захисту енергооб'єктів, в першу чергу ліній електропередачі.

Основні задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні основні задачі:

1. Виділення концептуальних положень методу алгоритмічних моделей, що складають його основу. Визначення принципових відмінностей алгоритмічної моделі як структурного елемента релейного захисту від імітаційної моделі об'єкта, що захищається, яка відтворює спостережувані в ньому процеси.

2. Розробка дистанційного захисту з уніфікованими характеристиками за

методом алгоритмічних моделей із застосуванням алгоритму локалізації альтернативних режимів роботи лінії електропередачі.

Методи дослідження. Дослідження проводились з використанням положень теоретичних основ електротехніки, теоретичних основ релейного захисту, методів математичного моделювання. Моделювання процесів проводилось в середовищі імітаційного моделювання Simulink. Розробка програмних модулів велась в середовищі програмування MATLAB.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Карабанов С. Г., Карпенко Г. В. АДАПТИВНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА В ПАКЕТІ MATLAB SINULINK.

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

Карабанов С. Г., Карпенко Г. В. МОДЕЛІ ТРАНСФОРМАТИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ПАКЕТІ MATLAB SINULINK

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.

Карпенко Г.В. МОДЕЛІ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ В ПАКЕТІ MATLAB SINULINK

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 208-210.

РОЗДІЛ 1

ФОРМУВАННЯ СИСТЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

1.1 Особливості розвитку технічних рішень захисту та автоматики ліній електропередачі

У функціонуванні РЗА ЛЕП виокремлюється інформаційний процес, пов'язаний з спостереженням об'єкта, прийняттям рішень та управлінням. Окремі елементи комплексу РЗА ЛЕП представлені на рисунку 1.1. Вимірювальні перетворювачі (ВП) підключаються безпосередньо до ЛЕП або на сусідніх з нею підстанціях (ПС). ВП перетворюють спостережувані величини в доступний для РЗА вигляд. Передача інформації в РЗА здійснюється по каналах зв'язку в залежності від виду даних. Так, при використанні електромагнітних вимірювальних трансформаторів струму та напруги використовуються мідні провідники з нормованим номінальним значенням вторинного струму та напруги, тоді як від електронних трансформаторів струму та напруги отримують інформацію в цифровому форматі (наприклад, за протоколом стандарту МЭК 61850-9-2) [14] по оптичних каналах зв'язку. Сучасні пристрої РЗА, представлені інтелектуальними електронними пристроями або терміналами, приймають і перетворюють отримані дані в форму, необхідну для аналізу режиму ЛЕП. В залежності від алгоритму пристрою РЗА обмінюються інформацією по цифрових каналах зв'язку (рідше – за допомогою дискретних сигналів) і формують команди у вигляді дискретних сигналів [14]. Через різні засоби сполучення, покликані посилити і перетворити ці сигнали, здійснюється вплив на елементи первинної схеми електричної мережі – комутаційні апарати (КА), наприклад, високовольні вимикачі. Визначення місць пошкодження (ВМП) та інші діагностичні функції пристроїв РЗА можуть надавати інформацію про режими ЛЕП на вбудованих і віддалених людино-машинних інтерфейсах [3].

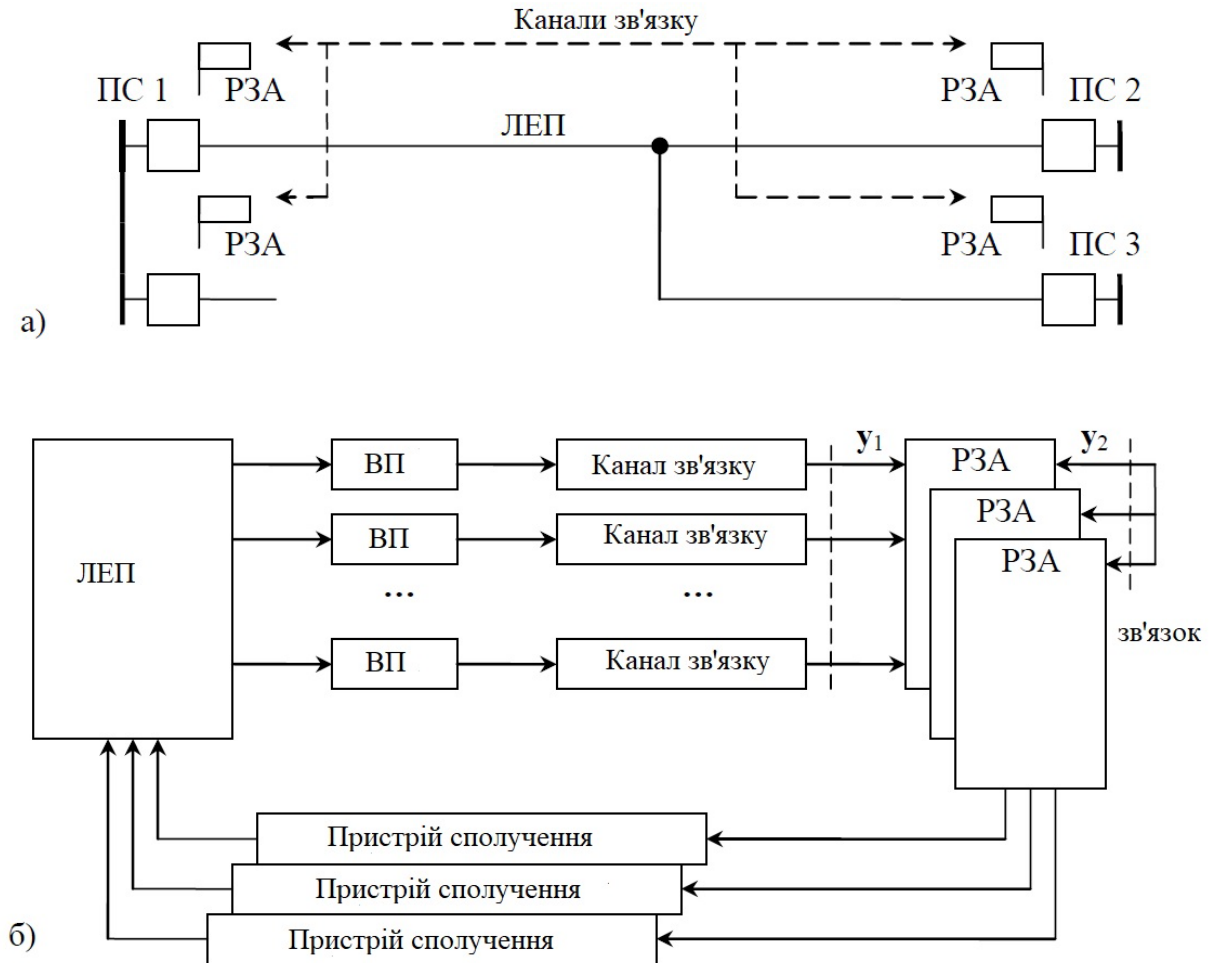


Рисунок 1.1 – Структура ЛЕП (а) та функціональна схема електротехнічного комплексу, що включає ЛЕП та пристрої захисту і автоматики (б)

Розвиток цифрових засобів РЗА ЛЕП у більшій мірі пов'язаний із вдосконаленням принципів спостереження об'єкта та алгоритмів обробки інформації [3]. Перші реле, основані на електромеханічному принципі, дозволяли контролювати діапазон однієї електричної величини з метою виявлення аварійних режимів. Але їх чутливість виявилася недостатньою, тому схему захисту почали виконувати з логічним об'єднанням реле з однією підведеною величиною, а згодом і з спільним перетворенням кількох вимірюваних величин, як, наприклад, в індукційних реле опору та напрямку потужності. Ці реле в більшій мірі використовували інформацію про аварійний процес, закладену в основній гармоніці струмів і напруг, які також

називаються параметрами аварійного режиму. Реле на напівпровідниковій, а згодом і мікропроцесорній основі дозволили значно розширити як обсяг охоплених алгоритмом вимірювань струмів і напруг, так і залучити вимірювання, виконані в передаварійному режимі, що надало системам РЗА властивість адаптивності [4].

Дистанційний принцип лежить в основі різних функцій РЗА ЛЕП. Більшість алгоритмів використовують вимірювання опору (фазного або міжфазного), виконане на основі основної гармоніки струмів і напруг [5]. Це перетворення ефективне в простих схемах на коротких лініях з одностороннім живленням, однак методичні похибки цього підходу, досліджені, наприклад, у [6,7], обмежують область його застосування. Окремим напрямком досліджень є підвищення стійкості дистанційних алгоритмів до похибок вимірювання струму [8,9] та до втрати ланцюгів напруги (наприклад, у [10-12]) шляхом відмови від використання відповідних величин в алгоритмі оцінки режиму. Відновлення інформації здійснюється за рахунок апріорного задання параметрів, що прилягають до ЛЕП електричних мереж у вигляді уставок або їх вимірювання в попередніх аварійних режимах, включаючи динамічні [13]. Алгоритми знаходять баланс між стійкістю до помилки вимірювань і похибкою оцінки аварійного режиму. В таких умовах підвищення точності оцінки може здійснюватися за рахунок залучення багатостороннього вимірювання електричних величин [14], однак це значно підвищує вартість рішення і знижує його автономність. У публікаціях також зазначається залежність алгоритмів від однорідності електричних параметрів по всій протяжності ЛЕП, що додатково обмежує їх застосування.

В цілому використання двостороннього вимірювання на ЛЕП знижує невизначеність оцінки місцезнаходження КЗ за рахунок виключення з розгляду параметрів системи, підключеної до віддаленої ПС. Серед таких алгоритмів можна відзначити оптимізаційні з критерієм за рівністю електричних параметрів, оцінюваних за даними кожної сторони окремо (наприклад, напруги) [6]. Можливе використання цих даних і для

безпосередньої оцінки невідомих параметрів схеми заміщення ЛЕП [3]. Потрібно зазначити, що за останні двадцять років цифровий зв'язок в електричних мережах усіх рівнів напруги отримав значний розвиток, а тому двосторонні алгоритми отримують все більше поширення [7]. Окремо необхідно відзначити використання синхронізованих векторних вимірювань (СВВ), виконуваних в окремих точках електричної мережі. На цій основі виконані як алгоритми дистанційного захисту, ВМП, автоматики ліквідації асинхронного режиму (АЛАР) та різних видів діагностики [2]. Більшість методів спирається на одночасне вимірювання величин струмів і напруг основної гармоніки.

У мікропроцесорних пристроях стало можливим розвиток дистанційних алгоритмів у сфері ускладнення моделей ЛЕП, що використовуються пристроями. При цьому можуть використовуватися показання фіксуючих приладів або приладів реєстрації аварійних подій [8]. До найбільш досконалих можна віднести односторонні алгоритми ВМП і дистанційного захисту, побудовані на адаптивному дистанційному принципі. Природний критерій резистивності пошкодження, що застосовується в точці передбачуваного пошкодження ЛЕП, дозволяє підвищити чутливість і точність одностороннього методу. Ключовою властивістю є використання детальної моделі ЛЕП та всієї доступної інформації у вигляді вимірювань в аварійному та попередньому режимах [9]. Тим не менш, дослідження показують, що неадекватність вбудованої моделі може призводити до суттєвих відхилень в оцінці режимів. Тому актуальним є вдосконалення моделей ЛЕП не лише в частині врахування індуктивного зв'язку, відгалужень, неоднорідності параметрів по довжині, але й в частині заземлення грозозахисних тросів і опор [8]. В результаті з'явилися оптимізаційні підходи до оцінки режимів, які отримали своє розвиток з узагальненням критеріїв і методів оптимізації на основі інформаційної теорії. Так, застосована оптимізація цільової функції відхилення векторів напруги моделі від виміряних з уточненням місця замикання при наявності обмежень на перехідний опір. Використання

більшого обсягу вимірювань, як видно, дає вищі результати в розпізнаванні. Тому виправданим є застосування віртуальних реле та інших непрямих методів розпізнавання [8].

Високі вимоги до РЗА ЛЕП обумовили появу багатовимірних методів розпізнавання режимів [6]. Їх систематизація та узагальнення щодо розпізнавання режимів ЛЕП виконані різними авторами. Найбільш ефективними видаються підходи зі зменшенням розмірності задач з використанням інформаційно ємних перетворень та процедур навчання [6,8]. Виокремлення найбільш ємних ознак може здійснюватися на базі узагальнених математичних процедур, зокрема, рішучих функцій та функцій відстані. Інтелектуальні алгоритми на основі нейронних мереж та нечіткої логіки також знайшли застосування в дистанційних алгоритмах РЗА ЛЕП. Дослідження [9] показали, що з їх застосуванням відпадає необхідність детального опису структури об'єктів, але досягається висока розпізнавальна здатність. Однак алгоритми навчання цих інтелектуальних модулів повинні бути предметом спеціального дослідження, оскільки забезпечення селективності спрацьовування таких пристроїв є складним завданням.

Важливим є й інший аспект розвитку РЗА. У [8] підтверджується, що «ефективними шляхами підвищення чутливості релейного захисту дальнього резервування є розширення інформаційної бази (використання принципу багатопараметричних захистів) та реалізація її вимірювальних органів на основі адаптації до режиму захищеної мережі та з контролем аварійних складових струмів і опорів.» Крім того, «важливим є контроль стану комутаційних апаратів і пристроїв суміжних пристроїв РЗА на захищеній ПС, що дозволяє забезпечити зниження витримок часу резервних захистів і в ряді випадків підвищити їх чутливість» [8]. Таким чином, запропоновано розвивати використання різних частотних складових і залучати для адаптації дискретну інформацію [2, 8].

Незважаючи на великий досвід застосування засобів ВМП, актуальним залишається підвищення точності їх роботи. Виділяються завдання, пов'язані

з моделюванням ЛЕП, з обробкою вхідних сигналів струмів і напруг [10]. Окремо стоять завдання використання статистики показань пристроїв ВМП під час КЗ на ЛЕП у часі та з спільною обробкою їх показань для уточнення координати. Визначаючи величину порогового рівня ймовірності, встановлюють інтервал можливих місць пошкодження.

Багатоваріантність режимів ЛЕП є наслідком великої кількості комбінацій параметрів прилеглих ділянок мережі, зміни параметрів джерел електроенергії, варіативності розподілу перетоків потужності, нестійкості окремих станів. Ці фактори обмежують можливості розпізнавання аварійних ситуацій [5].

У зв'язку з обмеженнями розпізнавання відбувається пошук нових видів інформації про КЗ та інші пошкодження ЛЕП, зокрема в високочастотній області. Можливе пряме використання частотних компонент, як, наприклад, у [8]. Велика протяжність ЛЕП призводить до просторового розподілу електричних величин, який може бути зареєстрований на високій частоті обробки. Відповідні процеси отримали назву хвильових. Дослідження хвильових процесів під час комутації призвело до появи пристроїв, що реалізують спостереження перехідних процесів, викликаних пошкодженням ЛЕП (пасивні хвильові) [8], і процесів відбиття від ЛЕП спеціально випромінюваних зондувальних імпульсів (активні хвильові) [11]. Розширені засоби обробки інформації дозволили виконати розпізнавання пасивними методами на основі кореляційної обробки [5], з використанням моделей ЛЕП [6]. Зазначається спільне використання низькочастотних і високочастотних методів [9]. Основними проблемами пасивних хвильових методів залишаються низька точність виявлення фронту першої та наступних хвиль, а також багатозначність оцінки відстані координати пошкодження.

У галузі активних хвильових методів ВМП виділяються роботи з подачею імпульсів різної форми та аналізом відхилень «портретів» від модельних або раніше виміряних зразків. Зазначається, що через підвищений шум на частотах зондування необхідно накопичення інформації в часі. Високою роздільною

здатністю володіють складні сигнали з частотною модуляцією [8]. Зберігається необхідність підвищення чутливості ВМП у зв'язку з малими змінами параметрів мережі в часі та складною структурою мережі. Крім того, актуальність і важливість захисту та автоматики при однофазному замиканні на землю ЛЕП з ізольованою нейтраллю підтверджується безліччю досліджень у цій галузі, зокрема з розробкою багатопараметричних рішень (наприклад, [9]).

1.2 Постановка інформаційних завдань та методологічна основа захисту та автоматики ліній електропередач

Аналіз показав, що системотехніка різних елементів РЗА ЛЕП має багато спільних завдань, пов'язаних з обробкою інформації. Вважається доцільним їхнє вирішення на основі методу інформаційного аналізу, що розвиває положення теорії уставок. Підвищення чутливості та швидкодії РЗА ЛЕП пов'язується з тимчасовою обробкою інформації, отриманої в розподіленій системі вимірювання. Необхідні методи виявлення зв'язку просторових характеристик об'єкта спостереження – ЛЕП – та тимчасових залежностей струмів і напруг. На першому етапі інформаційний аналіз застосовується до об'єкта захисту та виявляє його фізичну властивість – розпізнаваність аварійних ситуацій. На наступних етапах метод застосовується для синтезу розпізнавальних модулів РЗА на основі просторово-часової обробки інформації та надає можливості для їх оцінки.

Інформаційна база РЗА ЛЕП являє собою сукупність вимірювань електричних величин на інтервалі спостереження; вона також включає апріорні відомості про структуру та параметри імітаційних моделей спостережуваного об'єкта. У сучасних системотехнічних рішеннях додаткова інформація РЗА ЛЕП також включає ознаки якості інформації та оцінки режиму інших пристроїв і модулів. Автономна інтелектуальна РЗА також може скористатися апостеріорною інформацією про оцінку її попередніх спрацьовувань під час випробувань.

Методи оперують уявленнями про багатовимірні простори: m -вимірний об'єкт C , спостережуваний B та n -вимірний еталон A . Елементи об'єктного вектора $\mathbf{x} \in C$, що визначають стан об'єкта, поділяються за інформаційною ознакою на аварійні та нормальні, формуючи відповідні підвектори $\mathbf{x}_a$ та $\mathbf{x}_b$, так що $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b]^T$. У рамках аварійного підвектора розглядаються оцінювані та невідомі параметри пошкодження. Так, у захистах ліній до аварійних параметрів відносять координату місця КЗ x_f та, часто, вектор перехідних опорів $\mathbf{R}_f$. У задачах, пов'язаних з аналізом перехідних процесів, зокрема високочастотних, тимчасові характеристики аварійного режиму також слід віднести до складових підвектора $\mathbf{x}_a$. Момент часу, зокрема, задає фазу комутації і в значній мірі визначає інтенсивність перехідного процесу (викликаного пошкодженням), на який реагує захист. Також тимчасові характеристики важливі для нестационарних процесів, що розглядаються в РЗА: під час коливань та асинхронного ходу.

Область визначення підвектора $\mathbf{x}_b$, що містить залишкові параметри, зазвичай відома апіорно. Так, при інформаційному аналізі ЛЕП на основній частоті до нормальних параметрів відносять еквівалентні опори та електрорушійні сили (ЕРС) систем по кінцях лінії та інші величини, що дають повний опис режиму.

Кожному значенню об'єктного вектора $\mathbf{x}$ імітаційні моделі ставлять у відповідність єдину точку в просторі спостереження $\mathbf{y} \in B$, трансформовану модулями релейного захисту в власне уставочне простір $\mathbf{z} \in A$ з використанням апіорної інформації про імітаційну модель об'єкта. Точка вимірювання $\mathbf{z}$ може розглядатися або незалежно від ситуації на контрольованому об'єкті, або як відображення точки $\mathbf{x}$ об'єктного простору. Імітаційна модель об'єкта асоціюється з оператором F прямого перетворення вектора (області) параметрів об'єкта $\mathbf{x}(G)$ в n -мерний вектор (область) вимірювання $\mathbf{z}(S)$:

$$F(\mathbf{x})=\mathbf{z}; \quad (1.1)$$

$$F(G)=S, \quad (1.2)$$

де $\mathbf{x} \in G \subset C$, $\mathbf{z} \in S \subset A$.

В залежності від виду інформаційної задачі та алгоритму її розв'язання, установчий вектор $\mathbf{z}$ може складатися з миттєвих значень електричних величин, спектральних компонент, частотних або статистичних характеристик та інших розрахункових значень.

Під розпізнаваністю розуміється фізична властивість об'єкта взаємно однозначно перетворювати об'єктний і спостережуваний вектори (або області). Завдання дослідження розпізнаваності ставиться через протистояння областей G_α та G_β , що відносяться до відстежуваних (α) та альтернативних (β) режимів, у спостережуваному просторі через зближення відповідних вимірювань $\mathbf{y}$. На рисунку 1.2 простори для наочності зображені плоскими, а області G_α та G_β представлені прямокутниками. У просторі сигналів кожен режим $\mathbf{x}$ відображається у вигляді вектора $\mathbf{y}$ (перетворення умовно показано стрілкою). Відповідно, об'єктна область G відображається у вигляді фігури S .

Режими $\mathbf{x}_{\alpha\beta}$, відображення яких $\mathbf{y}_{\alpha\beta}$ не потрапляють в область $S_\beta(G_\beta)$, розпізнаються, тобто відрізняються від альтернативних. Режими $\mathbf{x}_{\alpha\alpha}$, відображення $\mathbf{y}_{\alpha\alpha}$ яких виявляються в області S_β , не розпізнаються. Таким чином, якщо режиму $\mathbf{x}_{\alpha\alpha}$ може бути протиставлений якийсь режим $\mathbf{x}_\beta$ такий, що $\mathbf{y}(\mathbf{x}_{\alpha\alpha}) = \mathbf{y}(\mathbf{x}_\beta)$, то він називається нерозпізнаваним. На практиці нерозпізнаваність режиму $\mathbf{x}_\alpha$ визначається оптимізаційною процедурою при обмеженні околиці ε на основі функції відстані $\text{dist}(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2)$:

$$\min_{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(\mathbf{y}(\mathbf{x}_\alpha), \mathbf{y}(\mathbf{x}_\beta)) \leq \varepsilon. \quad (1.3)$$

Множина нерозпізнаваних режимів утворює область нерозпізнаваності $G_{\alpha\alpha} \subset G_\alpha$. Інша частина області α -режимів розпізнавана: $G_{\alpha\beta} = G_\alpha \setminus G_{\alpha\alpha}$. Введення поняття про зворотне перетворення з простору сигналів в об'єктне α -простір показує, що області $G_{\alpha\alpha}$ та $G_{\alpha\beta}$ є зворотними перетвореннями областей $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$ та $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_{\alpha\beta}$ (рисунок 1.3).

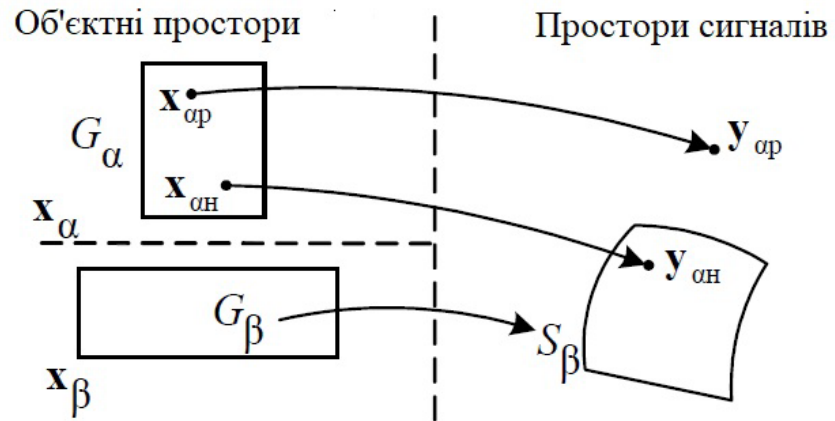


Рисунок 1.2 – Розпізнавані та нерозпізнавані режими x_α

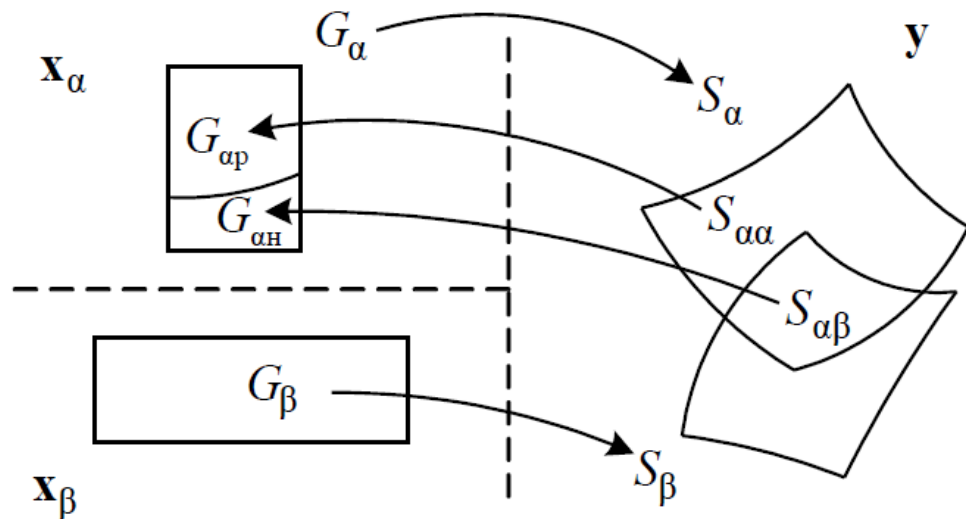
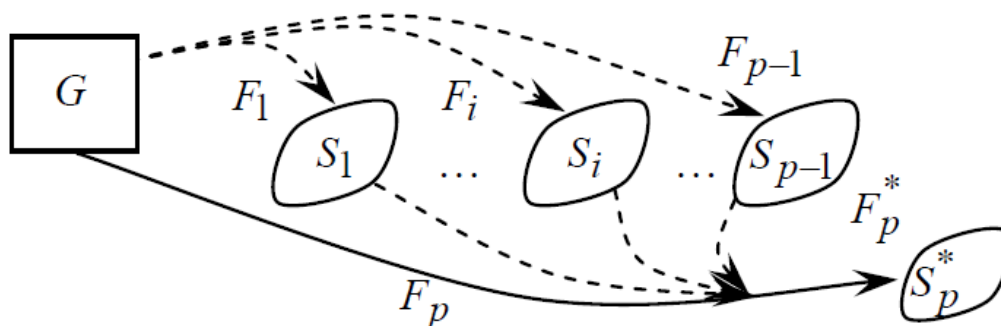


Рисунок 1.3 – Области розпізнаваних і нерозпізнаваних α -режимів

Установчий простір A може розглядатися як сукупність кількох підпросторів з залежними або незалежними координатами, що відповідає тому ж числу незалежних функцій прямого перетворення режиму. Розділення простору доцільно для задання алгоритмів спрацьовування РЗА ЛЕП з меншою розмірністю. Використовується умовне пряме перетворення, яке для заданого набору областей у кількох установчих підпросторах числом $p - 1$ (наприклад, $S_i, i = \overline{1, p-1}$,) дозволяє отримати область відображення в зазначене простір з номером p (наприклад, $(S_p^* = F_p^*(G, S_1, \dots, S_{p-1}))$), що ілюструє

рисуюнок 1.4. Узагальненням цієї процедури є адаптивне пряме перетворення, в якому області «стягуються» в поточні вимірювання, а область S_p^* визначається аналітично або на основі навчання. Цим забезпечується висока гнучкість реле з адаптацією в широкому сенсі [4].



Рисуюнок 1.4 – Ілюстрація умовного прямого перетворення

Чутливість захистів у даній роботі характеризується величиною об'єктної області розпізнаваних режимів. Чисельно та графічно вона визначається об'єктною характеристикою, яка повністю заміщує коефіцієнт чутливості [126]. Коефіцієнт чутливості отримав поширення, наприклад, в аналізі струмових захистів та захистів за напругою у зв'язку з використанням односистемних аналогових реле. Для реле з двома підведеними величинами необхідно визначити ієрархію розпізнаваних режимів, причому в уставочному просторі. Найчастіше віддається перевага відображенням металевих КЗ ЛЕП. Навпаки, процедура побудови та аналізу об'єктної характеристики має узагальнений характер і не залежить від принципу розпізнавання пошкоджень об'єкта. Так, зокрема, вона дозволяє оцінити якість дистанційного захисту та порівняти його з направленим струмовим або диференціальним захистом [5].

Об'єктна характеристика модуля РЗА будується в об'єктному просторі і показує область гарантовано розпізнаваних режимів об'єкта в координатах найбільш важливих об'єктних параметрів, наприклад, аварійних. У задачах захисту та ВМП ЛЕП, як правило, обирають координатні осі місця короткого замикання та перехідного опору. При цьому під об'єктною характеристикою

розуміють найменше нерозпізнаване значення параметра в залежності від величин, що входять у нормальний вектор.

Об'єктна характеристика універсальна тим, що вона дає кількісну оцінку не лише розпізнаванню пристроями РЗА, що залежить від конкретного алгоритму, але й розпізнаваності, яка є внутрішньою властивістю реального об'єкта.

Відносно аналізу аварійних ситуацій на ЛЕП розглядається протистояння двох режимів: відстежуваного α та альтернативного β . Кожному місцю замикання x_f , вектору нормальних та інших аварійних параметрів об'єкта $\mathbf{x}_b$ і виміру $\mathbf{z}_\gamma$ ставиться у відповідність значення об'єктної функції $R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}_\gamma)$, найменше значення якої на множині G_b названо об'єктною характеристикою виміру $R_{f,\inf}(x_f, \mathbf{z}_\gamma)$. Одна з реалізацій процедури визначення об'єктної характеристики.

$$R_{f,\inf}(x_f, \mathbf{z}_\gamma) = \arg \min_{R_f} \min_{\mathbf{x}_b \in G_b} \text{dist}(\mathbf{z}_\gamma, F_\alpha([x_f, R_f, \mathbf{x}_b]^T)), \quad (1.4)$$

де F_α – функція перетворення вектора параметрів імітаційної моделі ситуації α в точку вимірювання $\mathbf{z}$ уставного простору.

Відстань точки $\mathbf{z}_\gamma$ від альтернативної ситуації G_β також визначається мінімізаційною процедурою

$$\Delta_{\min}(\mathbf{z}_\gamma) = \min_{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(\mathbf{z}_\gamma, F_\beta(\mathbf{x}_\beta)). \quad (1.5)$$

Уявлення про інформаційну цінність точки (1.4) поширюються і на довільну область ΔS уставного простору. Їй відповідає сегмент об'єктних характеристик, верхня і нижня межі якого визначаються наступними процедурами:

$$R_{f,\inf,\inf}(x_f, \Delta S) = \inf_{\mathbf{x}_b \in G_b} \inf_{\mathbf{z} \in \Delta S} R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}) \geq 0;$$

$$R_{f,\inf,\sup}(x_f, \Delta S) = \inf_{\mathbf{x}_b \in G_b} \sup_{\mathbf{z} \in \Delta S} R_f(x_f, \mathbf{x}_b, \mathbf{z}) \geq 0,$$

а віддаленість від альтернативних ситуацій G_β

$$\Delta_{\min}(\Delta S) = \min_{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta, \mathbf{z} \in \Delta S} \text{dist}(\mathbf{z}, F_\beta(\mathbf{x}_\beta)).$$

Нехай задана установча область $S_{\text{уст}}$ пристрою РЗА. Тоді умова спрацьовування захисту використовується для виявлення верхніх і нижніх об'єктних функцій:

$$F_\alpha([x_f, R_f, \mathbf{x}_b]^T) \in S_{\text{уст}} \Rightarrow \begin{matrix} R_{f,\text{sup}}(x_f, \mathbf{x}_b) \\ R_{f,\text{inf}}(x_f, \mathbf{x}_b) \end{matrix} \quad (1.9)$$

В об'єктну характеристику захисту включаються лише ті координати x_f , де гарантується спрацьовування при металевих замиканнях:

$$\begin{cases} R_{f,\text{sup,inf}}(x_f) = \min R_f(x_f, \mathbf{x}_b) \\ R_{f,\text{inf}}(x_f, \mathbf{x}_b) \equiv 0. \end{cases} \quad (1.10)$$

Для їх створення вирішуються наступні загальні інформаційні задачі, детально розглянуті нижче.

1. Діагностична задача. При її вирішенні оцінюють інтервал визначення одного або кількох об'єктних параметрів: координати в задачі ВМП або компонентів сигналів у фільтрації інформаційних складових. Наприклад, контролюється значення $x_{1\text{уст}}$ заданого аварійного параметра x_1 , яке формує лінію або поверхню, що складає область G_α : $x_1 = x_{\text{уст}}$ з загальної однорідної області $G \subset C$, та області $G_{\beta 1}$ і $G_{\beta 2}$ при інших значеннях x_1 . Потрібно визначити розширення поверхні G_α в обидва боки вздовж осі x_1 , тобто підобласті нерозпізнаваності 1 β - і 2 β -режимів $G_{\alpha\beta 1}$ та $G_{\alpha\beta 2}$, їх об'єднання $\widehat{G}_\alpha$, що охоплює всі режими, не відмінні від одного, принаймні, відстежуваного режиму, а також оцінки крайніх значень $\Delta x_{1\text{inf}}$, $\Delta x_{1\text{sup}}$ інтервалу невизначеності значення $x_{1\text{уст}}$ (рисунок 1.5). Режим x_β , що формують область $\widehat{G}_\alpha$, відповідають умові.

$$\min_{\mathbf{x}_b \in G_b, \mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(F(\mathbf{x}_\beta), F([x_{1\text{уст}}, \mathbf{x}_b]^T)) < \varepsilon, \quad (1.11)$$

де G_b – область визначення підвектора $\mathbf{x}_b$ розмірності $(n-1)$, складеного з усіх елементів вектора $\mathbf{x}$, крім x_1 .

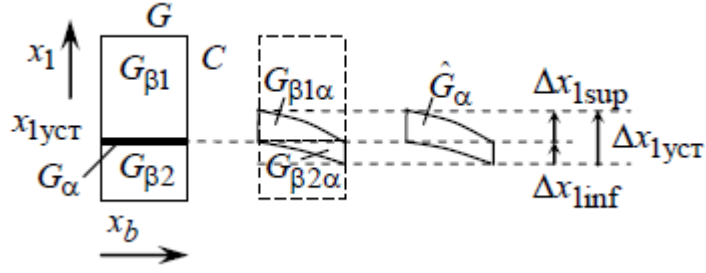


Рисунок 1.5 – Ілюстрація перетворень діагностичної задачі

При розв'язанні діагностичної задачі часто проводиться екстраполяція процесу. Вона може розглядатися в двох вимірах. Екстраполяція в часі виконується на базі n -мерного вимірювання у вигляді вибірки з відліків сигналу, наприклад, $\mathbf{y} = [i_{k-n}, i_{k-n+1}, \dots, i_{k-1}]^T$ (рисунок 1.6). Для розв'язання задачі використовується імітаційна модель об'єкта з об'єктною областю G . Екстраполяція в просторі виконується аналогічними перетвореннями вектора спостереження $\mathbf{y}$, наповненого вимірюваннями в різних точках об'єкта. У цьому випадку імітаційна модель пов'язує вхідні та вихідні величини на одному інтервалі часу.

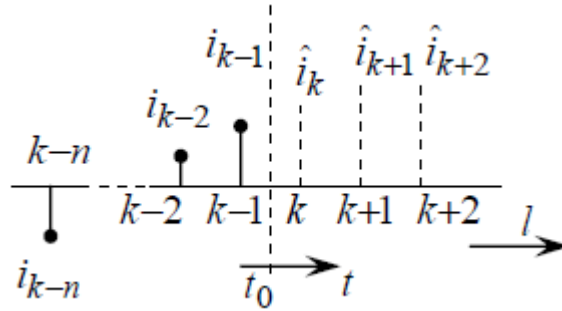


Рисунок 1.6 – Екстраполяція процесу, що спостерігається в часі до моменту $l = k-1$, та координати його екстраполяції $\hat{i}_l, l \geq k$.

На основі інтервальної екстраполяції може виконуватись інтервальний фільтр аварійної складової на час після моменту зміни процесів t_0 , наприклад,

$$i_{ab}(t) = i(t) - \hat{i}(t), \quad t \geq t_0 \quad (1.12)$$

з подальшим його використанням для розпізнавання режимів роботи об'єкта або сегментації процесів у часі чи верифікації вимірювань.

2. Ситуаційна задача. Завдання пов'язане з вибором одного з можливих різнотипних режимів, що мають структурні відмінності, і охоплює, наприклад, фазові селектори, пускові органи. Імітаційні моделі F_α і F_β режимів α і β різні, і тому області $G_\alpha \subset C_\alpha$ і $G_\beta \subset C_\beta$ визначення їх параметрів в загальному випадку задані в різних просторах. Якщо режими однорідні, виникає приватний випадок ситуаційної задачі – граничний, характерний, наприклад, для дистанційного захисту ЛЕП. Збільшення кількості альтернативних один одному ситуацій не супроводжується ускладненням математичного апарату задачі: за допомогою оптимізаційної процедури

$$\min_{\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha, \mathbf{x}_\beta \in G_\beta} \text{dist}(F_\alpha(\mathbf{x}_\alpha), F_\beta(\mathbf{x}_\beta)) < \varepsilon \quad (1.13)$$

3. Установча задача. Для вирішення перерахованих задач розпізнавання необхідний апарат маніпуляцій в установчому просторі. Спроби використання методів обчислювальної геометрії не дали практично відчутних результатів. Ставиться задача побудови установчих областей у підпросторах такої розмірності, яка відповідає обчислювальним можливостям пристрою РЗА. При цьому повинно забезпечуватися максимальне наближення до розпізнаваності режимів. Метою побудови $S_{\text{уст}}$ є найбільш повне охоплення області

$$S_{\alpha\alpha} = F_\alpha(G_\alpha) \setminus F_\beta(G_\beta) \quad (1.14)$$

з контролем за умовами:

$$\Delta_{\min}(S_{\text{уст}}) > \varepsilon. \quad (1.15)$$

4. Імітаційне завдання. Завдання полягає в синтезі еквівалентних моделей, покликаних зменшити розмірність задачі розпізнавання. На заміну складній імітаційній моделі з вичерпними параметрами простору C синтезується

еквівалентна їй модель $F_{\text{екв}}$ з параметрами $C_{\text{екв}}$. Неваріативні параметри еквівалентної моделі визначаються за критерієм мінімуму нев'язки

$$\Delta x_{1\max} = \max(|x_1 - x_{1\text{екв},\min}|, |x_{1\text{екв},\max} - x_1|);$$

$$x_{1\text{екв}} = \text{Pr}1 H_{\text{екв}}; H_{\text{екв}} = F^{-1}(\Delta G_{\text{екв}}, \mathbf{z}); \mathbf{z} = F(\mathbf{x} \in \Delta G); \mathbf{x}_{\text{екв}} \in \Delta G_{\text{екв}}.$$

Висновки по першому розділу

Метод інформаційного аналізу надає інструментарій для вирішення задач розпізнавання режимів ЛЕП: постановка задачі РЗА з визначенням об'єктних параметрів та області їх варіації, виявленням протиставлених режимів та їх основного протиріччя; визначення області розпізнаваності аварійної ситуації стосовно альтернативних режимів; побудова уставної характеристики з попереднім вибором координатних осей; дослідження відхилення уставної області від альтернативних ситуацій; визначення чутливості релейного захисту до відстежуваних коротких замикань або, що те ж саме, якості розпізнавання ситуації α як здатності відрізнити її від альтернативних ситуацій.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

2.1 Концепція розпізнавання методу

Захищений енергооб'єкт є частиною електричної мережі. Нехай вектор x символізує режим мережі; $x \in G$, де G – множина режимів. У склад імітаційної моделі мережі входить автономна модель захищеного об'єкта. Режими, обумовлені його пошкодженням і, отже, підлягаючі розпізнаванню, необхідно виділити в особливе підмножина G_α . Будемо називати їх контрольованими або відстежуваними, або ще простіше α -режимами G_α , $x \in \alpha$. Залишкові режими G_β , $x \in \beta$, назовемо альтернативними або β -режимами. У підмножину G_β входять всі нормальні режими мережі, а також пошкодження поза захищеним об'єктом. Зауважимо, що $G = G_\alpha \cup G_\beta$.

Про захищений об'єкт є поточна та апріорна інформація. Поточна інформація представлена у вигляді вектора струмів і напруг у місцях спостереження: $u(k) = [i^T(k), u^T(k)]^T$, де k – дискретний час. Апріорна інформація про структуру та параметри об'єкта робить можливим побудову моделі для його непошкодженого стану. Вона менш визначена, ніж імітаційна модель, не торкається решти частини мережі. Більше того, в ній можуть бути присутні недооприділені елементи. Наприклад, гілка намагнічування трансформатора або ротор електричної машини. Тим не менш, такі елементи фізично обумовлені в тому сенсі, що їхня поведінка підпорядковується відомим закономірностям.

Алгоритмічна модель енергооб'єкта представляє перетворювач спостережуваних електричних величин у вимірювання. Перетворення відбувається правильно лише в тому випадку, якщо захищений об'єкт не пошкоджений [4,5]. Таким чином, до числа основних функцій алгоритмічних моделей належать наступні:

- Розмежування режимів різного типу, що пояснюється адекватністю моделі спостережуваному об'єкту в β -режимах електричної мережі та неадекватністю в α -режимах.
- Формування з вихідних величин вимірювань. Це двохкоординатні величини, кожна з яких відображається на своїй площині. На кожне вимірювання реагує віртуальне реле.
- Локалізація відображень β -режимів завдяки властивості адекватності та належному підбору вимірювань.
- Навчання віртуальних реле шляхом активування алгоритмічної моделі сигналами імітаційної моделі, що відтворює режими заданого типу. Перш за все визначаються області відображення S_β множини G_β , що є метою навчання блокуючих віртуальних реле, які забезпечують селективність дії релейного захисту [12].

Кожному з різнотипних режимів підмножин β -режимів може відповідати своя алгоритмічна модель і окремі віртуальні реле. Нестача апріорної інформації про імітаційну модель об'єкта робить доцільним побудову різних алгоритмічних моделей для попереднього та чисто аварійного режимів.

Здатність релейного захисту до розпізнавання визначається об'єктною характеристикою – прообразом тієї частини межі обраної області відображення β -режимів, яка потрапляє в область відображення α -режимів. Нестача апріорної інформації про імітаційну модель об'єкта робить доцільним побудову різних алгоритмічних моделей для попередніх та чисто аварійних режимів. Розпізнавальна здатність релейного захисту визначається об'єктною характеристикою – прообразом тієї частини межі обраної області відображення β -режимів, яка потрапляє в область відображення α -режимів.

Будучи структурними елементами релейного захисту, перетворювачі спостережуваних величин у вимірювання, алгоритмічні моделі принципово відрізняються від імітаційних і потребують власної теорії. Імітаційна модель об'єкта (ІМО) відтворює режими роботи системи, до складу якої входить

$$\underline{\mathbf{V}}_{\text{тк}} = \left[\underline{\mathbf{U}}_{\text{тк}}^T, \underline{\mathbf{I}}_{\text{тк}}^T \right]^T, \quad \underline{\mathbf{V}}_{\text{пл}} = \left[\underline{\mathbf{U}}_{\text{пл}}^T, \underline{\mathbf{I}}_{\text{пл}}^T \right]^T.$$

Режим $\mathbf{x}_\alpha$ вважається абсолютно нерозпізнаваним, якщо результати його спостереження збігаються з результатами спостереження якогось β -режиму. Умова абсолютної нерозпізнаваності режиму $\mathbf{x}_\alpha$

$$\underline{\mathbf{V}}(\mathbf{x}_\alpha) = \underline{\mathbf{V}}(\mathbf{x}_\beta \in G_\beta), \quad (2.1)$$

$\underline{\mathbf{V}} = \left[\underline{\mathbf{U}}_{\text{пл}}^T, \underline{\mathbf{I}}_{\text{тк}}^T \right]^T$, де виділяє з множини G_α підмножину $G_{\alpha\beta}$ абсолютно нерозпізнаваних (при наявній інформаційній базі) режимів $\mathbf{x}_{\alpha\beta} \in G_{\alpha\beta}$. [28] Залишається підмножина $G_{\alpha\alpha} = G_\alpha \setminus G_{\alpha\beta}$ потенційно розпізнаваних режимів $\mathbf{x}_{\alpha\alpha} \in G_{\alpha\alpha}$. Щоб віднести спостережуваний режим $\mathbf{x}$ до $G_{\alpha\alpha}$, необхідно насамперед переконатися, що він не належить до множини G_β . Алгоритмічні моделі є інструментом вирішення цієї задачі. Інформаційну базу алгоритмічної моделі складають спостережувані величини $\mathbf{V}_{\text{тк}}$, $\mathbf{V}_{\text{пл}}$, а також апіорні відомості про структуру та параметри захищуваного об'єкта.

2.2 Типи алгоритмічних моделей

Тип алгоритмічної моделі та її специфічні режими визначаються повнотою спостереження об'єкта. У випадку повного спостереження на всіх входах алгоритмічної моделі будуть відомі і струми, і напруги. На рисунку 2.1 показано один з двопровідних каналів пасивної алгоритмічної моделі П з двома входами s, r та невідомим місцем КЗ f . Відомі величини – $\underline{I}_s, \underline{U}_s, \underline{I}_r, \underline{U}_r$, невідомі – $\underline{I}_f, \underline{U}_f$. Можливі дві модифікації вхідних величин – спостережуваного поточного режиму $\underline{I}_{\text{тк}}, \underline{U}_{\text{тк}}$ або штучного чисто аварійного режиму $\underline{I}_{\text{ав}}, \underline{U}_{\text{ав}}$; вони виробні від поточних і попередніх, останні екстраполюються на час після КЗ.

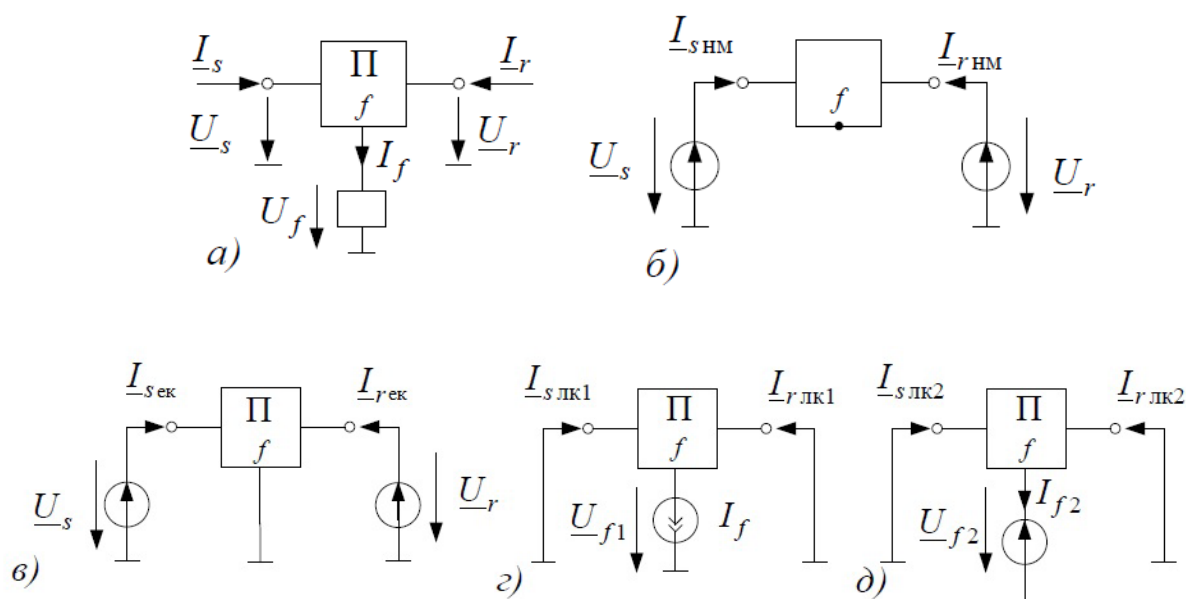


Рисунок 2.1 – Режими алгоритмічної моделі при повному спостереженні об'єкта: *а* – поточний або чисто аварійний, *б* – нормальний, *в* – екстремальний, *г* і *д* – локальний.

Пошкодження може бути нелінійним. Тим не менш, принцип компенсації дозволяє зберегти лінійність моделі, представивши пошкодження у вигляді залежного джерела, включити на входах моделі ЕРС $\underline{U}_s$ і $\underline{U}_r$, виділити нормальний режим холостого ходу в місці f або екстремальний режим металеві КЗ в тому ж місці і прийти в результаті до локального режиму, створюваного невідомим джерелом, що діє з місця КЗ при зашунтованих входах моделі. Алгоритмічна модель локального режиму універсальна з цілого ряду причин. Вона відокремлена від моделей інших частин системи, формований нею універсальний вимір у вигляді співвідношення локальних струмів вирішує в рівній мірі всі завдання розпізнавання пошкоджень спостережуваного об'єкта аж до визначення місця КЗ. Залежність виміру від координати x_f місця КЗ визначається лише моделлю Π і може бути визначена заздалегідь, якщо параметри моделі зафіксовані, або ж після її адаптації до попереднього режиму.

Предметом особливої уваги стало неповне спостереження об'єкта, як це відбувається при односторонньому спостереженні лінії електропередачі (рисунок 2.2а). Алгоритмічна модель, адекватна непошкодженному

$\underline{I}_z^{ал}$, $\underline{U}_z^{ал}$ (рисунок 2.2б), з яких формуються виміри дистанційного захисту. Для локалізації пошкодження необхідна алгоритмічна модель довільного ділянки лінії до точки x , що видає координатні годографи $\underline{I}^{ал}(x)$, $\underline{U}^{ал}(x)$.

Алгоритмічна модель як структурний елемент дистанційного захисту відображає особливості захищеної зони від місця спостереження s до кінця зони z в відсутність пошкодження. З вихідних величин алгоритмічної моделі в різних режимах $\underline{I}_{z\text{ пд}}^{ал}$, $\underline{U}_{z\text{ пд}}^{ал}$, $\underline{I}_{z\text{ тк}}^{ал}$, $\underline{U}_{z\text{ тк}}^{ал}$, $\underline{I}_{z\text{ ав}}^{ал}$, $\underline{U}_{z\text{ ав}}^{ал}$ формуються заміри, задача яких полягає в розмежуванні відстежуваних замикань у зоні захисту (α -режими) від альтернативних режимів (β -режими) – замикань поза зоною (β_f), перемикань та інших робочих режимів (β_n).

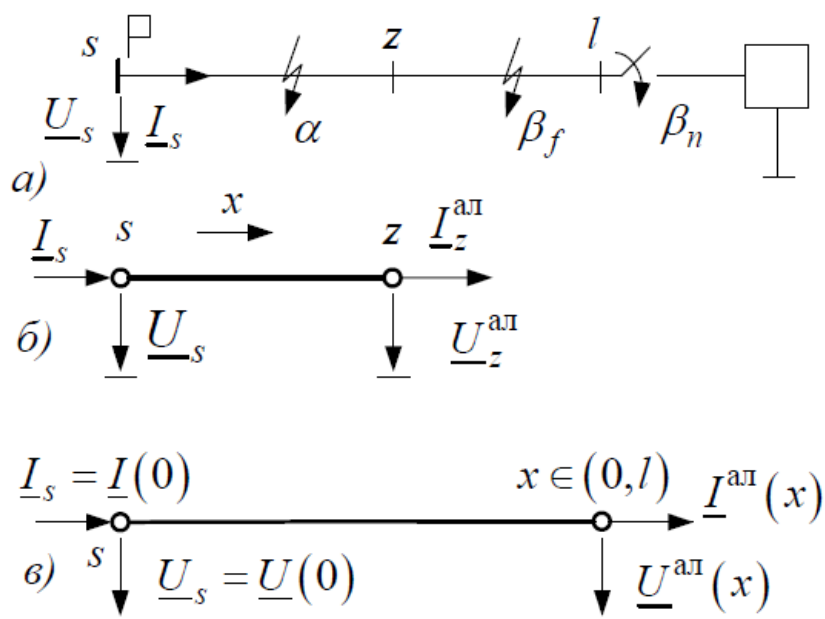


Рисунок 2.2 – Спостережувана лінія електропередачі та її алгоритмічні моделі *а* – спостережувана лінія, *б* – алгоритмічна модель для дистанційного захисту, *в* – для визначення місця КЗ

Критерії розмежування режимів

Наскільки відомо, перше згадування про подібний критерій зустрічається в матеріалах шведського відділення (м. Вестерос) компанії АББ. Там введено

поняття «загальний критерій пошкодження (general fault criteria)» (ЗКП), яке в нашій термінології стосується відхилення від нормальних режимів β_n . Розвиток термінології пов'язаний з процедурою локалізації однотипних режимів [8,12]. Локалізація, що сприяє відхиленню від режимів певного типу, здійснюється на площині комплексного вимірювання. Локалізоване безліч режимів відображається у вигляді компактної області. Чим помітніше область відображення β -режимів буде зміщена відносно області відображення α -режимів, тим ефективніше локалізація β -режимів.

2.3 Інструмент годографів

Годограф місця КЗ та годограф місця передбачуваного замикання входять до арсеналу методу алгоритмічних моделей [3,14]. Перший представляє собою характеристику реального КЗ з варіюючим перехідним опором. Другий – сукупність вимірювань того ж типу, що й характеристика, але в випадковому місці. Перетин характеристики з координатним годографом визначає місце КЗ. У місці КЗ з координатою x_f та перехідним опором R_f існують взаємозв'язки між напругами трьох режимів – попереднього $\underline{U}_{ав}(x_f)$, поточного $\underline{U}_{тк}(x_f)$ та чисто аварійного $\underline{U}_{ав}(x_f) = \underline{U}_{тк}(x_f) - \underline{U}_{пд}(x_f)$ [5]. Електрична система представляє собою відносно місця КЗ еквівалентний генератор з внутрішнім опором $\underline{Z}_{вн}(x_f) = Z_{вн}(x_f) \exp(j\varphi_{вн}(x_f))$ та ЕРС, рівною напрузі попереднього режиму $\underline{U}_{пд}(x_f)$. Опір R_f є навантаженням еквівалентного генератора (рисунок 2.3).

Характеристика місця КЗ задається співвідношеннями між напругами різних режимів:

$$\underline{K}(x_f, \lambda_f) = \frac{\underline{U}_{тк}(x_f)}{\underline{U}_{ав}(x_f)} = \lambda_f e^{j(\pi - \varphi_{вн}(x_f))},$$

$$\underline{M}(x_f, \lambda_f) = \frac{\underline{U}_{ав}(x_f)}{\underline{U}_{пд}(x_f)} = \frac{-1}{1 + \lambda_f \exp(-j\varphi_{вн}(x_f))},$$

де λ_f - дійсний додатний параметр

$$\lambda_f = \frac{R_f}{Z_{\text{BH}}(x_f)} \quad (2.4)$$

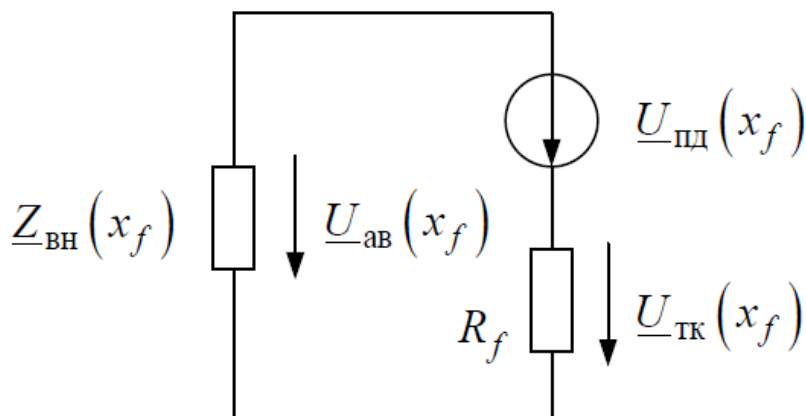


Рисунок 2.3 – Контур навантаження еквівалентного генератора

Залежності (2.2), (2.3) від параметра λ_f , що змінюється в межах від нуля до безкінечності, представляють собою годографи у вигляді променя на площині $\underline{K}$ та у вигляді дуги на площині $\underline{M}$ (рисунок 2.4).

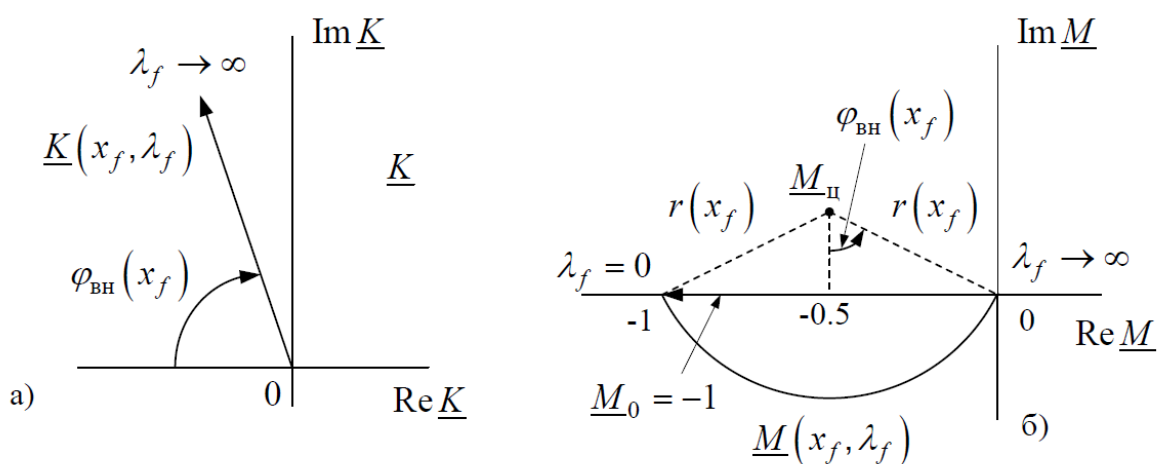


Рисунок 2.4 – Характеристики места КЗ с координатой x_f

а – годограф (2), б – годограф (3)

Дуга радіуса

$$r(x_f) = \frac{1}{2 \sin(\varphi_{\text{BH}}(x_f))}$$

З центром в точці

$$\underline{M}_{\text{П}}(x_f) = 0.5(-1 + j \operatorname{ctg}(\varphi_{\text{BH}}(x_f)))$$

Опирається на незмінну хорду $\underline{M}_0 = -1$. Опис годографа (2.3) в полярній формі

$$\begin{aligned}\underline{M}(x_f, \theta) &= \underline{M}_0(x_f) + r \exp(j\theta), \\ -90^\circ - \varphi_{\text{BH}}(x_f) &\leq \theta \leq -90^\circ + \varphi_{\text{BH}}(x_f).\end{aligned}$$

Колові діаграми (2.3) з загальною хордою $M_0 = -1$, але з різними кутами $\varphi_{\text{BH}}(x_f)$, не перетинаються одна з одною, як не перетинаються і промені (2.2). Варіації пасивних параметрів електричної системи при незмінному місці КЗ призводять до змін кута $\varphi_{\text{BH}}(x_f)$, створюючи тим самим сегменти годографів. Однорідній мережі притаманні інваріантні характеристики – один промінь і одна дуга. У мережі без втрат промінь йде по осі уявних, а дуга стає півколом.

Розглянуті залежності дозволяють сформулювати два виміри:

$$\underline{K}^{al} = \frac{\underline{U}_{mk}^{al}}{\underline{U}_{ag}^{al}}, \quad (2.5)$$

$$\underline{M}^{al} = \frac{\underline{U}_{ag}^{al}}{\underline{U}_{nd}^{al}}. \quad (2.6)$$

Замір $M^{al}(x_z)$ уніфікує алгоритм розпізнавання пошкодження в зоні захисту завдяки властивості алгоритмічної моделі (рисунк 2.2а) створювати замір [14], адекватний протікаючому процесу при КЗ поза зоною, коли відношення $M(x_f)$ локалізується, як на рисунку 2.4б, і неадекватний реальній ситуації при КЗ в зоні, що й лежить в основі розмежування областей відображення α - і β_f -режимів. Локалізація β_n - режимів, створюваних комутаціями, підпорядковується іншим закономірностям, обумовленим особливостями ланцюга, підключеного до захищеної лінії. Так, при підключенні до лінії активної схеми (рисунк 2.5а) замір (7) визначиться виразом

$$\underline{M}(x_z) = \frac{\underline{Z}_{\text{BH}}(x_z)}{\underline{Z}_{\text{BH}}(x_z) + \underline{Z}_{\text{ДП}} + \underline{Z}_{r3}} \left(\frac{\underline{E}_{r3}}{\underline{U}_{\text{ПД}}(x_z)} - 1 \right),$$

де $\underline{U}_{\text{ПД}}(x_z)$, $\underline{Z}_{\text{ПД}}(x_z)$ $\underline{E}_{re}$, $\underline{Z}_{re}$ – параметри двох еквівалентних генераторів, $\underline{Z}_{\text{ПД}}$ – опір ділянки лінії від кінця захищеної зони до кінця лінії. При варіаціях параметрів еквівалентних генераторів вимір (7) описується годографами –

функціями кута γ , $\gamma = \arg(\underline{U}_{\text{нд}}(x_z), \underline{E}_{re})$, що проходять в околицях початку координат (рисунок 2.5б).

Алгоритмічна модель локатора замикання (рисунок 2.2в), на відміну від алгоритмічної моделі захисту зони, варіабельна: її вихідні величини – функції координати x , а вимір являє собою координатний годограф $\underline{K}^{\text{нд}}(x)$, точка перетину якого з променем $\underline{K}(\lambda)$ визначить координату місця КЗ. Модуль внутрішнього опору системи $\underline{Z}_{\text{вн}}(x_f)$ на положення променя впливу не впливає. Координатний годограф, будучи функціональним виміром, має цікаву здатність контролювати всі точки лінії, спочатку інтерпретуючи кожен як місце передбачуваного пошкодження. Властивість, затребувана не лише приватним завданням локалізації, але й більш загальними завданнями релейного захисту.

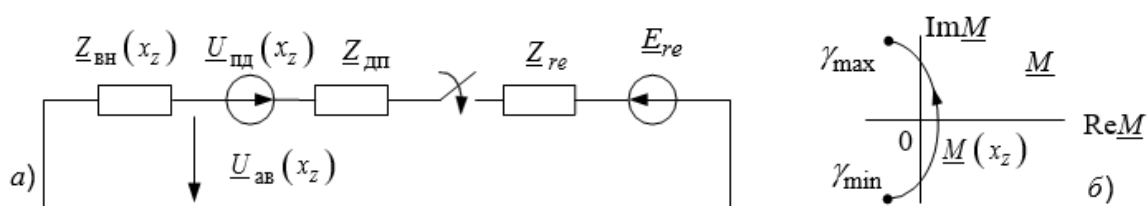


Рисунок 2.5 – а) модель підключення активної цепи,

б) годограф $\underline{M}(x_z)$ при варіації γ

Метод алгоритмічних моделей застосовано до розв'язання задачі фазової селекції КЗ в лінії електропередач за величинами лише одного поточного режиму. Актуальність фазової селекції такого роду пояснюється тим, що вона реалізує серед іншого функцію загального критерію пошкодження. Алгоритмічна модель об'єкта (АМО) охоплює всю непошкоджену лінію з виділенням каналу нульової послідовності та каналів центрованих (безнульових) фазних величин, позначених на рисунку 6 штрихами. Фазові та лінійні вимірювання вибудовуються у вигляді відношення вихідних і вхідних напруг алгоритмічної моделі.

$$\underline{H}_v^{\text{ал}} = \frac{\underline{U}_{rv}^{\text{ал}}}{\underline{U}_{sv}^{\text{ал}}}, \quad \underline{H}_{v,v-1}^{\text{ал}} = \frac{\underline{U}_{rv}^{\text{ал}} - \underline{U}_{r,v-1}^{\text{ал}}}{\underline{U}_{sv}^{\text{ал}} - \underline{U}_{s,v-1}^{\text{ал}}}, \quad v = A, B, C$$

Вимірювання (8) чутливі до неадекватності моделі непошкодженої лінії стосовно реальної ситуації, завдяки чому з'являється можливість розпізнати вид відбулося короткого замикання, обираючи його з 10 можливих варіантів. На стадії навчання фазового селектора безліч режимів кожного виду короткого замикання відображається на площинах вимірювань.

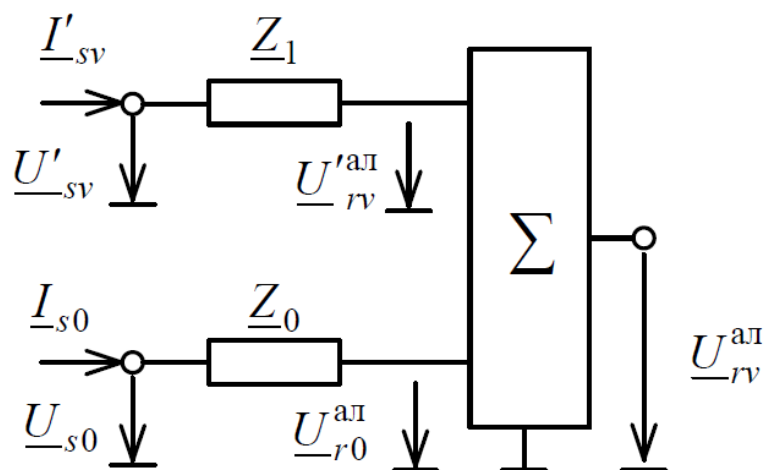


Рисунок 6 – Алгоритмічна модель фазового селектора.

Області відображення $S(d)$, де d – індекс виду КЗ, лежать в основі процедури фазової селекції. Прості види КЗ достатньо відобразити на одній площині. Однофазні КЗ відображаються областю $S(K_v^{(1)})$ на площині вимірювання $\underline{H}_v^{\text{ал}}$. Двохфазне замикання на землю $K_{v,v-1}^{(1,1)}$ – бажано відобразити трьома областями на площинах $\underline{H}_v^{\text{ал}}$, $\underline{H}_{v-1}^{\text{ал}}$ – і $\underline{H}_{v,v-1}^{\text{ал}}$. Процедура розпізнавання виконується в інверсному порядку, коли альтернативні ситуації виключаються одна за одною. Взаємні перетини областей відображення видів КЗ при такому підході не впливають на результат. Метою пошуку стає факт пошкодження тієї чи іншої фази незалежно від виду КЗ. Так, для визначення $K_A^{(1)}$ необхідно виключити види $d = K_B^{(1)}, K_C^{(1)}, K_{BC}^{(2)}$ і $K_{BC}^{(1,1)}$.

$$\underline{H}_q^{\text{ал}} \notin S(d), \quad (9)$$

де q – індекс відповідної площини відображення вимірювань. $S_q(d)$ – область відображення вимірювань d -го режиму на q -ій площині.

Висновки по другому розділу

Метод алгоритмічних моделей містить ряд прийомів, призначених для розпізнавання пошкоджень контрольованого об'єкта. Сюди входять розділення режимів електричної мережі на контрольовані та альтернативні, локалізація альтернативних режимів, уніфікація характеристик блокування, виявлення контрольованих режимів, формування вимірювань з вихідних величин алгоритмічних моделей, розмежування всередині підмножини альтернативних режимів окремих різнотипних груп та локалізація кожної групи автономною алгоритмічною моделлю.

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АЛГОРИТМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ З УНІФІКОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В даний час багато хто проявляє велику активність у розробці алгоритмів цифрової обробки сигналів. Для цього використовуються швидкодіючі фільтри ортогональних складових. На перший погляд, підвищення швидкодії негативно позначається на селективності релейного захисту. Зокрема, представляє інтерес взаємозв'язок швидкодії релейного захисту та його здатності розпізнавати короткі замикання в захищеній зоні лінії електропередачі (ЛЕП). У постановку задачі синтезу швидкодіючого фільтра для дистанційного захисту входить умова збереження традиційного базису комплексних величин як основи формування вимірювань, за якими дистанційний захист приймає рішення про спрацьовування [6,9]. Вимірювання відображається на своїй комплексній площині. Перетворення відліків на вікні спостереження в поточний комплексний сигнал виконує спеціальний фільтр ортогональних складових [12]. На короткому вікні спостереження буде відчуватися сильний вплив вільної складової процесу короткого замикання. Інформаційний аналіз, де центральне місце займає уявлення про розмежування режимів двох типів, доповнюється концепцією максимального швидкодії, яка полягає в навчанні релейного захисту на поточному вікні спостереження, починаючи з перших відліків після виникнення короткого замикання [5].

Нехай Δt – інтервал дискретизації спостережуваного процесу, n – порядок нерекурсивного фільтра. Час його встановлення $t_{\text{вст}} = (n + 1) \Delta t$. Нехай далі T – період частоти мережі і $N = T/\Delta t$ – кількість відліків на періоді. У фільтра даного типу порядок зростає на одиницю з приходом кожного нового відліку вхідної величини $\nu(k)$, де $k = 0, n - 1$; $k = 0$ – момент першого зчитування після короткого замикання, n – кількість відліків на вікні спостереження, що також є порядком фільтра, $n - 1$ – аргумент вихідного комплексного сигналу $V(n - 1)$.

Використаємо наступну модифікацію фільтра ортогональних складових, отриманого в [12].

$$\underline{V}(n-1) = \underline{M}(n-1) \left[\underline{K}[n-1] \underline{S}(n-1)^* - n \underline{S}(n-1)^* \right], \quad (3.1)$$

$$\underline{M}(n-1) = \frac{2j}{\text{mod}^2 \underline{K}(n-1) - n^2},$$

$$\underline{K}(n-1) = \sum_{k=0}^{n-1} e^{j2\alpha k},$$

$$\underline{S}(n-1) = \sum_{k=0}^{n-1} v(k) e^{j\alpha k},$$

де $\alpha = 2\pi/N$, зірочкою позначені спряжені комплекси, $\text{mod} K = K$. Корисним доповненням до алгоритму виділення ортогональних складових є операція попередньої обробки вимірювань спостережуваної величини $u(k)$, що усуває аперіодичну складову, незначно змінюючи в межах будь-якої трійки сусідніх вимірювань. На множині з n вимірювань можна скласти $n-2$ групи з трьох сусідніх вимірювань. Нехай $h = \overline{0, n-3}$ – номер групи, що збігається з моментом зняття першого вимірювання в групі. В межах кожної групи приймемо модель спостережуваного процесу у складі синусоїдальної та сталої складових.

$$u(k) = U_m(h) \sin(\alpha k + \psi(r)) + U_0(h), \quad (3.2)$$

$$k = h, h+1, h+2.$$

Остання виділяється наступною операцією з трьома відліками

$$U_0(k) = \frac{1}{4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} [u(k) - 2u(k+1) \cos(\alpha) + u(k+2)], \quad (3.3)$$

$$k = h.$$

Вхідний сигнал фільтра ортогональних складових формується шляхом усунення складової $U_0(k)$ з кожного відліку

$$v(k) = u(k) - U_0(k), \quad (3.4)$$

$$k = 0, n-3,$$

і лише для двох останніх відліків з останньої групи з номером $r = n-3$, коли $k = n-3, n-2, n-1, -$

$$v(k) = u(k) - U_0 (n-3). \quad (3.5)$$

Навчальна імітаційна модель. Двопровідна імітаційна модель відтворює трьохфазні та міжфазні замикання в симетричній електропередачі. У лінії з двостороннім живленням індекси s і r належать різним її сторонам, індекс «з» – кінцю захищеної зони, l – довжина лінії, з l – довжина зони (рисунок 3.1). Індексом α позначаються короткі замикання в захищеній зоні, індексом β – замикання поза зоною, $x_{f\alpha}$ і $x_{f\beta}$ – координати місць замикання того чи іншого режиму: $0 \leq x_{f\alpha} < l_3$; $l_3 < x_{f\beta} \leq l$.

Значення фіксованих параметрів моделі та діапазони зміни варіюваних параметрів наведені в таблицях 3.1 і 3.2. Прийняті такі описи ЕРС джерел: $e_s(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$, $e_r(t) = E_m \sin(\omega t + \psi - \delta)$. Варіюються початкова фаза ψ і кут передачі δ , а також момент τ першого считывання вхідних величин після відбулося в лінії короткого замикання (рисунок 3.2).

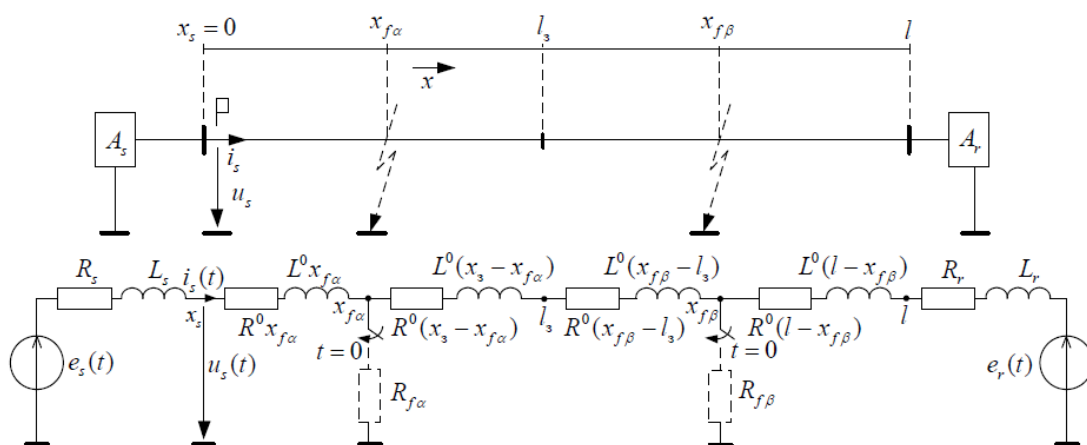


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель лінії електропередачі в режимі трьохфазного короткого замикання.

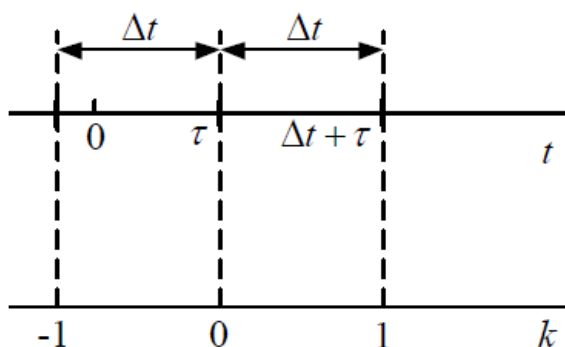


Рисунок 3.2 – Взаємозв'язок осей неперервного та дискретного часу

Таблиця 3.1 – Фіксовані параметри імітаційної моделі

E_m , кВ	R_s , Ом	X_s , Ом	R_r , Ом	X_r , Ом	R^0 , Ом/км	X^0 , Ом/км	l , км	l_3 , км	Δt , мс
$110\sqrt{\frac{2}{3}}$	1	10	1	10	0,1	0,4	100	85	1

Таблиця 3.2 – Варіативні параметри імітаційної моделі

δ , град	τ , мс	$x_{f\alpha}$, км	$x_{f\beta}$, км	$R_{f\alpha}$, Ом	$R_{f\beta}$, Ом	ψ , град
-30...30	0...1	0...85	85...100	0...100	0... ∞	0...180

Сигналами імітаційної моделі є вимірювання струму та напруги $i_s(k)$, $u_s(k)$, $k = 0, n$, $n \geq 3$. Число n повинно бути більше двох через застосування операції (3.3) над трьома вимірюваннями. Виконувати після неї операції (3.4), (3.5) і потім (3.1) формують комплекси $I(n-1)$ та $U(n-1)$, за якими визначається вимірювання опору

$$\underline{Z}(n-1) = \frac{\underline{U}(n-1)}{\underline{I}(n-1)}.$$

Навчання модуля опору відбувається на комплексній площині $\underline{Z}(n-1)$ і полягає в відображенні вимірювань $\underline{Z}_\alpha$ та $\underline{Z}_\beta$ відповідно α - та β -режимів [54]. Якщо S_α та S_β – області відображення множин цих режимів, то область спрацьовування дистанційного захисту $S_{\alpha\alpha}$ асоціюється з різницею двох областей: $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_\beta$. Інша частина області S_α , а саме її перетин з областю S_β , не може бути включена в область спрацьовування захисту. Як наслідок, всі короткі замикання в зоні захисту, відображення яких потрапляють в область перетину $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$ не підлягають розпізнаванню. Розпізнавальна здатність модуля опору оцінюється об'єктною характеристикою – залежністю межі перехідного опору $R_{f\alpha}$ в умовах спрацьовування від координати місця короткого замикання $x_{f\alpha}$. Умова спрацьовування, в свою чергу, визначається потраплянням вимірювання в область $S_{\alpha\alpha}$.

$$\underline{Z}(n-1, x_{f\alpha}, R_{f\alpha}, \psi, \delta, \tau) \in S_{\alpha\alpha}, \quad (3.6)$$

де в аргументі вимірювання вказані всі варіюючі параметри – аварійні $x_{f\alpha}$ та $R_{f\alpha}$ і нормальні ψ , δ та τ . Оптимізаційний пошук в межах області $S_{\alpha\alpha}$ максимуму перехідного опору $R_{f\alpha\max}$, мінімізованого за нормальними параметрами, визначить шукану об'єктну характеристику

$$R_{f\alpha\max\min}(n-1, x_{f\alpha}) = \max_{R_f} \min_{\psi, \delta, \tau} \arg \left[\underline{Z}(n-1, x_{f\alpha}, R_{f\alpha}, \psi, \delta, \tau) \in S_{\alpha\alpha} \right]$$

де $\arg[Z(x) \in S]$ є множина значень вектора x , при яких виконується умова належності вимірювання $\underline{Z}$ області S . Результати навчання. Області $S_{\alpha\alpha}$, наведені на рисунку 3.3, отримані при дискретизації струму $i_s(t)$ та напруги $u_s(t)$ імітаційної моделі за рисунком 3.1 з частотою 1 кГц ($N = 20$). Виміри опору $\underline{Z}(n-1)$ при $N = 3, 5, 10$ (рисунки 3.3а, б, в) сформовані з участю операцій (3.5)-(3.6) та фільтра ортогональних складових (3.1). Вимір опору $\underline{Z}_{\text{уст}}$ (рисунок 3.3г) іншого походження [8]. Він отриманий в установившомуся режимі короткого замикання після затухання вільного процесу на вікні спостереження, рівному періоду частоти мережі ($n = N = 20$). В аргументі з п'яти варіюючих параметрів моделі зберігаються лише три – x_f , R_f та δ .

Об'єктні характеристики (3.7), отримані для кожної з чотирьох областей $S_{\alpha\alpha}$ на рисунку 3.2, наведені на рисунку 3.3. Розпізнавальні властивості модуля опору при замиканні поблизу місця її встановлення характеризуються значенням $R_{f\alpha\max\min}(0)$ яке вказане в таблиці 3.3 для всіх чисел n від трьох до десяти.

Таблиця 3.3 – Початкове значення об'єктної характеристики (при $x_{f\alpha} = 0$)

n	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{f\alpha\max\min}(0)$, Ом	42	41	41	40	41	40	39	38

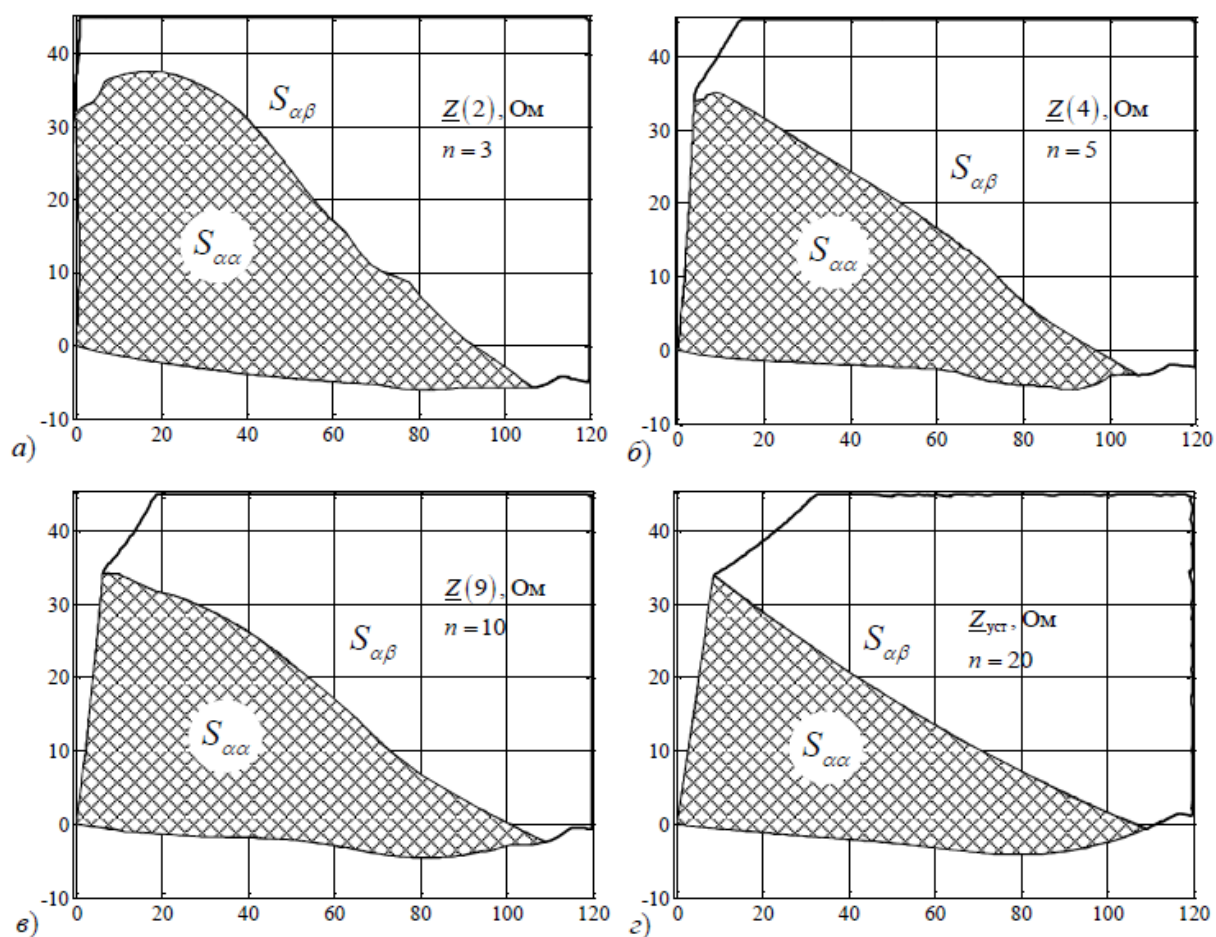


Рисунок 3.3 – Области спрацьовування модуля опору при розширювальному вікні спостереження

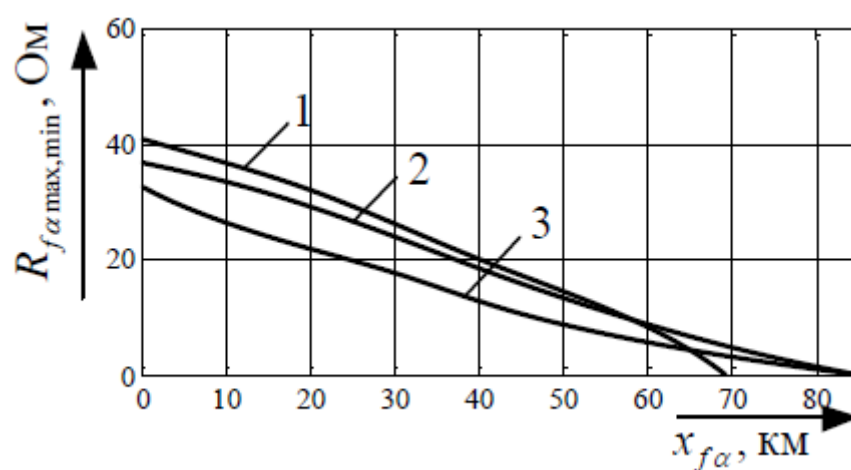


Рисунок 3.4 – Об'єктні характеристики 1 – при $n = 3$; 2 – при $n = 5$; 3 – в установившомуся режимі короткого замикання при $n = 20$

Цікава закономірність, виявлена в розв'язанні поставленої задачі, не вписується в звичні уявлення. Виявилося, що з збільшенням вікна

спостереження розпізнавальні властивості захисту змінюються не зовсім так, як очікувалося. На мінімальному вікні спостереження ($n = 3$) має місце невелике укорочення захищеної зони, але в іншому розпізнавальна здатність захисту виявляється вищою, ніж у синусоїдальному усталеному режимі короткого замикання (об'єктні характеристики 1 і 3 на рисунку 3.4). Явища, яке на перший погляд виглядає дивно, має просте пояснення. Справа в тому, що в процедурі навчання релейного захисту фільтр ортогональних складових формує комплексні сигнали з величин перехідного процесу разом з його вільною складовою. Навчання полягає в розмежуванні α - і β -режимів. Вільний процес підкреслює інтенсивність коротких замикань у зоні захисту в порівнянні з замиканнями поза зоною і тим самим сприяє розпізнаванню перших, допомагаючи не плутати їх з другими.

Висновки по третьому розділу

У дистанційному захисті лінії електропередач особливу роль відіграє вимір, що дорівнює відношенню комплексу аварійної складової напруги до комплексу попередньої напруги. Саме на площині цього виміру задаються уніфіковані характеристики, що обмежують області локалізації альтернативних режимів.

ВИСНОВКИ

1. Метод алгоритмічних моделей містить низку прийомів, призначених для розпізнавання пошкоджень контрольованого об'єкта. Сюди належать розділення режимів електричної мережі на контрольовані та альтернативні, локалізація альтернативних режимів, уніфікація характеристик блокування, виявлення контрольованих режимів, формування вимірювань з вихідних величин алгоритмічних моделей, розмежування всередині підмножини альтернативних режимів окремих різнотипних груп і локалізація кожної групи автономною алгоритмічною моделлю.

2. У вирішенні задачі розпізнавання пошкоджених проводів затребувані різноманітні методи адаптивного релейного захисту: локалізації альтернативних режимів контрольованого об'єкта, алгоритмічних моделей непошкодженого об'єкта двокоординатних вимірювань, навчання розпізнавальної структури сигналами імітаційної моделі об'єкта, відображення підмножин однотипних режимів у вигляді областей на площинах вимірювань, оцінки розпізнавальної здатності модуля, що пройшов навчання, за методом об'єктних характеристик.

3. Локація місця пошкодження здійснюється за допомогою алгоритмічних моделей, що пов'язують годографи вимірювань для місць передбачуваного замикання з притаманними місцю КЗ співвідношеннями між напругою поточного режиму та аварійними складовими струму і напруги.

4. Метод інформаційного аналізу та його гілка — метод алгоритмічних моделей — уможливають уніфіковану індикацію пошкодження не тільки спостережуваної частини електропередачі, але і її неспостережуваних гілок. Уніфікація забезпечується здатністю алгоритмічних моделей враховувати апріорну інформацію про контрольований об'єкт і локалізувати відображення спостережуваних режимів, альтернативних пошкодженням у заданій частині об'єкта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Задачин В. М. 3-15 Моделювання систем : конспект лекцій / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2010. – 268 с.
2. Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКРЕТНО НЕПЕРЕРВНИХ СТОХАСТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЛОКСХЕМ АЛГОРИТМІВ ЇХ ПОВЕДІНКИ – Львів «Львівська політехніка»: 2008. - 123
3. Кирик В. В., Халіков В. А. Комп'ютерні технології моделювання та дослідження електротехнічних систем. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, Академія муніципального управління МОН України, 2009. 216 с.
4. Волочій Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем. – Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2004. – 220 с.
5. Волочій Б.Ю. Технології моделювання алгоритмів функціональної та надійнісної поведінки телекомунікаційних систем // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Випуск 35. – Київ. – 2006. – С. 31 – 40.
6. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. I частина. Навчальний посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.
7. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ А.О./ Омельчук, А.М., Б.П. Савченко, // Національний університет біоресурсів і природокористування України- Енергетика і автоматика", №4, 2013 р
8. Лут М.Т., Наливайко В.А., Радько І.П. Діагностування енергетичного обладнання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – 2-е вид., перероб. і доп. К.: Вид – во ТОВ «Аграр Медіа Груп, 2014. – 590 с.
9. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І. В. Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки

України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 72 с.

10. Verlan A.F., Polozhaenko S.A., Prokofieva L.L., Shylov V.P. “Diagnosis of substances, which characterize the properties of independent observation and control”. Applied Aspects of Information Technology. 2018; Vol. 1, No. 1: 33-47. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.01.2018.2>.

11. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / Суходоля О. М.– К. : НІСД, 2022. – 49 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>

12. М.М. Свідницький, Ю.С. Приходько, Т.Т. Сердюк, О.М. Максимчук АНАЛІЗ ТА ВИБІР МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ /Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна//Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 28-29 листопада 2018.

13. K. Ellithy Optimal shunt capacitors allocation in distribution networks using genetic algorithm- practical case study [Электронный ресурс] / K. Ellithy, A. Al-Hinai, A. Moosa - URL: <http://www.ijesp.com/Vol3No1/IJESP3-2Elithy.pdf>

14. Liu, Yutian Reactive power compensation and voltage control in jinan power distribution system [Электронный ресурс] / Yutian Liu, Jiachuan Shi, Xia Qian // 18th International Conference on Electricity Distribution, 6-9 june 2005. - Turin, 2005. - URL : http://www.cired.be/CIRED05/papers/cired2005_0057.pdf.

15. Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Бахмут, 18-20 листопада 2019 р.) / Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії [упоряд. П.О. Чикунів]. – Бахмут: ННППІ УПА, 2019. – 214 с.