

ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9965-2018-2(45)-57-83

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАНЬ 6 – 10 кВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО СПЕЦПРОЦЕСОРА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ, ІНВАРІАНТНОГО ДО ЗМІНИ АМПЛІТУД ФАЗНИХ СТРУМІВ

¹О. П. Люра, ²Н. Я. Возна, ²Я. М. Николайчук

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: oleg.lura14@gmail.com

²Тернопільський національний економічний університет;
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46009; e-mail: nvozna@ukr.net

Запропоновано алгоритми для виявлення та інваріантної ідентифікації перехідних процесів у лініях електропередач типу накидів, коротких замикань, та пуску потужних електроприводів, за якими визначено функції пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач. Подано структуру малогабаритного мікроелектронного швидкодіючого пристрою релейного захисту з розширеними функціональними можливостями розпізнавання накидів та захисту високовольтних ЛЕП (ліній електропередач) від коротких замикань, здійснено синтаксис його функцій. Це дозволило успішно застосовувати розроблений метод та пристрій для одночасного розпізнавання накидів, коротких замикань та пуску потужних електроприводів. Викладено інформаційну технологію проектування структурних рішень спецпроцесора релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

Ключові слова: накид, коротке замикання, спецпроцесор, електродвигун, перехідні процеси.

Предлагаются алгоритмы выявления и инвариантной идентификации переходных процессов в линиях электропередач типа набросов, коротких замыканий и пуска мощных электроприводов, по которым определены функции устройства релейной защиты высоковольтных линий электропередач. Представлена структура малогабаритного микроэлектронного быстродействующего устройства релейной защиты с расширенными функциональными возможностями распознавания набросов и защиты высоковольтных ЛЭП от коротких замыканий, проведен синтаксис его функций. Это позволило успешно применять разработанный метод и устройство для одновременного распознавания набросов, коротких замыканий и пуска мощных электроприводов. Представлена информационная технология проектирования структурных решений спецпроцессора релейной защиты высоковольтных линий электропередач.

Ключевые слова: наброс, короткое замыкание, спецпроцессор, электродвигатель, переходные процессы.

The fast-acting algorithms of exposure and invariant authentication of transients in the lines of electricity transmission as load surge, short circuits and start of powerful electric engines were developed; based on that, the functions of relay defense device of high-voltage lines of electricity transmission were determined. The given structure of small, microelectronic fast-acting device of relay defense is with the extended functional possibilities of recognition of load surge and defense of high-voltage lines of electricity transmission from short circuits, the syntax of his functions was presented. This device can be used for load surge recognition and short circuits, invariant to the size of increase currents in the separate phases of electric lines. It allowed successful application of the developed method and device for simultaneous recognition of load surge, short circuits and starting of powerful electric engines. The information technology of designing structural solutions of relay protection special processor for high-voltage electricity transmission lines was presented.

Keywords: load surge, short circuit, special processor, electric motor, transient processes.

Вступ. На сьогодні підвищення надійності електрообладнання високовольтних ліній електропередач полягає, з однієї сторони, у підвищенні надійності та покращенні експлуатаційних характеристик обладнання, а, з іншої, у вдосконаленні комп'ютеризованих засобів діагностування збурень при виникненні коротких замикань.

Для цього, виходячи з аналізу цифrogram математичних і натурних експериментів, актуальними є розроблення швидкодіючих алгоритмів, придатних до застосування на діючих лініях електропередач [1, 2].

Важливими кроками при вирішенні даної проблеми є проведення аналізу та виявлення недоліків існуючих інформаційних алгоритмів ідентифікації коротких замикань у високовольтних лініях електропередач та вироблення рекомендацій щодо їх вдосконалення [3].

Діагностування та розпізнавання спотворень гармонічних сигналів у високовольтних лініях електропередач (ЛЕП) найчастіше виконується за результатами спектрального аналізу та методу найменших квадратів Байєсівського підходу.

Обчислення наявності спотворюючих гармонік спектральним аналізом та методом найменших квадратів характеризується великою алгоритмічною, часовою та апаратною складністю, а також потребує великої вибірки – понад 10-15 періодів сигналів промислової частоти [1].

Відомі пристрої релейного захисту мають обмежені функціональні можливості, обумовлені тим, що, моделюючи цифровою обробкою функції реле струму, не дозволяє автоматично розпізнавати накиди та короткі замикання в ЛЕП, коли вхідні амплітуди зростання струму у фазі є інваріантними, а характер спотворень струму не опрацьовується [2-3].

Актуальність. Актуальною задачею при створенні сучасних інформаційних систем контролю технологічних параметрів та створенні приладів контролю якості є розроблення теоретичних засад цифрового опрацювання гармонічних сигналів для опису технологічних параметрів об'єктів. Особливо важливою задачею розпізнавання гармонічних сигналів є ідентифікація їх спотворень у високовольтних енергетичних системах при виникненні коротких замикань, що призводить до зміни їх кореляційних та спектральних характеристик. Успішне рішення такої задачі може бути досягнуто на основі квадратично-імпульсного перетворення сигналів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття. Як бачимо, існуючі на сьогоднішній день пристрої релейного захисту мають певні недоліки через недосконалість їх будови та обмежених функціональних можливостей.

Тому невирішеною проблемою залишається розроблення досконалих методів чіткого розпізнавання не тільки накидів та коротких

замикань у високовольтних лініях електропередач, а й інших видів замикань.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження збурень та перехідних процесів у високовольтних лініях електропередач. Розроблення теоретичних засад, методів розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків потужних електроприводів у системах енергопостачання технологічних установок нафтогазової промисловості. А також створення мікроелектронних компонентів пристроїв релейного захисту на основі цифрового опрацювання сигналів.

Основна частина

1. Функції та характеристики релейного захисту розподільчих високовольтних електричних мереж

Релейний захист елементів розподільчих мереж повинен відповідати чотирьом вимогам, що висуваються до всіх пристроїв релейного захисту: селективність, швидкодія, чутливість та надійність.

Селективна дія захисту забезпечує відключення тільки пошкодженої ділянки мережі найближчим до неї вимикачем. Швидкодія релейного захисту зменшує розміри пошкодження в місці КЗ, забезпечує безперебійну роботу споживачів неушкодженої частини електричної мережі. Чутливістю релейного захисту називають його здатність реагувати на всі види пошкоджень і аварійних режимів, які можуть виникати в межах основної зони, що підлягає захисту, та зони резервування. Надійність релейного захисту визначається як її спрацюванням у всіх необхідних випадках, так і неспрацюванням у випадках, коли у захисті немає потреби.

У процесі експлуатації електричних машин, апаратів, повітряних ліній електропередач можуть відбуватися порушення нормальних режимів роботи і виникати uszkodження, що приводять до коротких замикань.

У більшості випадків аварій або їх розвитку можна уникнути шляхом швидкого відключення uszkodженої ділянки електричної установки або мережі за допомогою релейного захисту.

При відключенні вимикачів uszkodженого елемента гасне електрична дуга в місці короткого замикання, припиняється проходження струму короткого замикання і відновлюється нормальна напруга на неушкодженій частині електроустановки або мережі.

Завдяки цьому можна запобігти uszkodженню чи зменшити його розміри або наслідки, на якому виникло коротке замикання, а також відновлюється нормальна робота неушкодженого устаткування.

Таким чином, основним призначенням релейного захисту є виявлення місця виникнення короткого замикання і швидке автоматичне відключення вимикачів uszkodженого устаткування або ділянки мережі від іншої неушкодженої частини електричної установки або мережі.

Крім ушкодження електричного устаткування можуть виникати порушення нормальних режимів його роботи, а саме: перевантаження, замикання на землю однієї з фаз в мережі з ізольованою нейтраллю, виділення газу через розкладання оливи в трансформаторі або зниження рівня оливи в його розширювачі.

Отже, другим призначенням релейного захисту є виявлення порушення в режимі роботи устаткування з подаванням попереджувальних сигналів обслуговуючому персоналу або відключення устаткування з затримкою в часі.

Типові структури високовольтних електромереж та їх режимні характеристики представлені у табл. 1 [16]. Розрізняють такі типи мереж електропостачання промислових підприємств та технологічних установок:

1. Чотирипровідна мережа напругою 380 В;
2. Мережа високої напруги із з'єднанням навантажень у зірку з нульовим проводом.
3. Схема змішаної трифазової-однофазової мережі.
4. Принципова схема трифазової мережі з використанням землі в якості провідника.
5. Схема радіальної мережі.
6. Схема простої замкненої мережі з одним джерелом живлення.
7. Схема складної замкненої мережі з одним джерелом живлення.
8. Лінія з двостороннім живленням.
9. Складна замкнена мережа з кількома джерелами живлення.
10. Схема живлення нафтовидобувних установок.
11. Структура електропостачання нафтовидобувного промислу.

2. Аналіз перехідних процесів та спотворень гармонічних сигналів при виникненні збурень у високовольтних лініях електропередач

2.1. Експериментальні дослідження перехідних процесів в електромережах під час запуску потужних електроприводів

Перехідні процеси у електромережах 6 – 10 кВ досліджували за даними реєстрації координат фазових напруг, напруг в нейтралі і струмів при комутації режимів роботи енергосистем. Експериментальні дані реєстрували мікропроцесорною керувально-діагностичною системою «Альтра» [2], яка розроблена Інститутом мікропроцесорних систем контролю і управління об'єктами електроенергетики (ІМСКОЕ).

Система здійснює локальний та дистанційний моніторинг стану ізоляції електричної мережі 6 – 35 кВ з довільною конфігурацією з ізольованою або компенсованою нейтраллю.

Система «Альтра» виконує безперервний у реальному часі моніторинг стану ізоляції приєднань на електричній підстанції визначення ділянки із пошкодженням та її локалізації.

До функцій системи «Альтра» входять:

- фіксування часткових пробів ізоляції довільної тривалості, за якими ведеться діагностування стану ізоляції ділянок мережі;

- визначення ділянки електричної мережі з ослабленою ізоляцією, дистанційна передача інформації про її координати на диспетчерський пункт;

- вимкнення у випадку однофазових замикань на землю із забезпеченням відповідної селективності;

- відображення на моніторі диспетчерського пункту схеми мережі, ідентифікація ділянки з ослабленою ізоляцією;

- дистанційне управління комутаційними апаратами підстанцій на розподільчих пристроях обладнаних відповідними приводами.

На рис. 1 показані графіки спотворень гармонічних сигналів при комутації режимів роботи енергосистем.

З рис. 1 видно, що при комутації режимів роботи енергосистем струми можуть зростати у кілька разів. Найчастіше це спостерігається при різкому підвищенні напруг в нейтралі.

Досліджуючи перехідні процеси струмів і напруг, виявлено, що часто один тип нештатної ситуації розвивається і переходить в інший. Наприклад, на рис. 2 показано графіки струмів і напруг нештатної ситуації, яка почалась з двополярної дуги на відносному інтервалі часу [0,1; 0,3]. Потім на [0,3; 0,92] мс розвиток аварії в однополярну несиметричну дугу і на інтервалі [0,92...] перехід у двополярну симетричну дугу. Як видно з наведеного графіка, кожен вид аварійних ситуацій має характерний тип перехідних процесів. Проте на сьогоднішній день не існує методів і засобів для автоматизованого визначення типу аварії і, тим більше, місця пошкодження чи пошкодженого обладнання.

Експериментальні цифрові накиди в електричних мережах при успішному запуску потужних електроприводів показано на рис. 2, 3 [4].

З рисунків видно, що характеристики наростання струмів у процесі запуску потужних електроприводів не спостерігається від'ємна експоненціальна складова, характерна для коротких замикань.

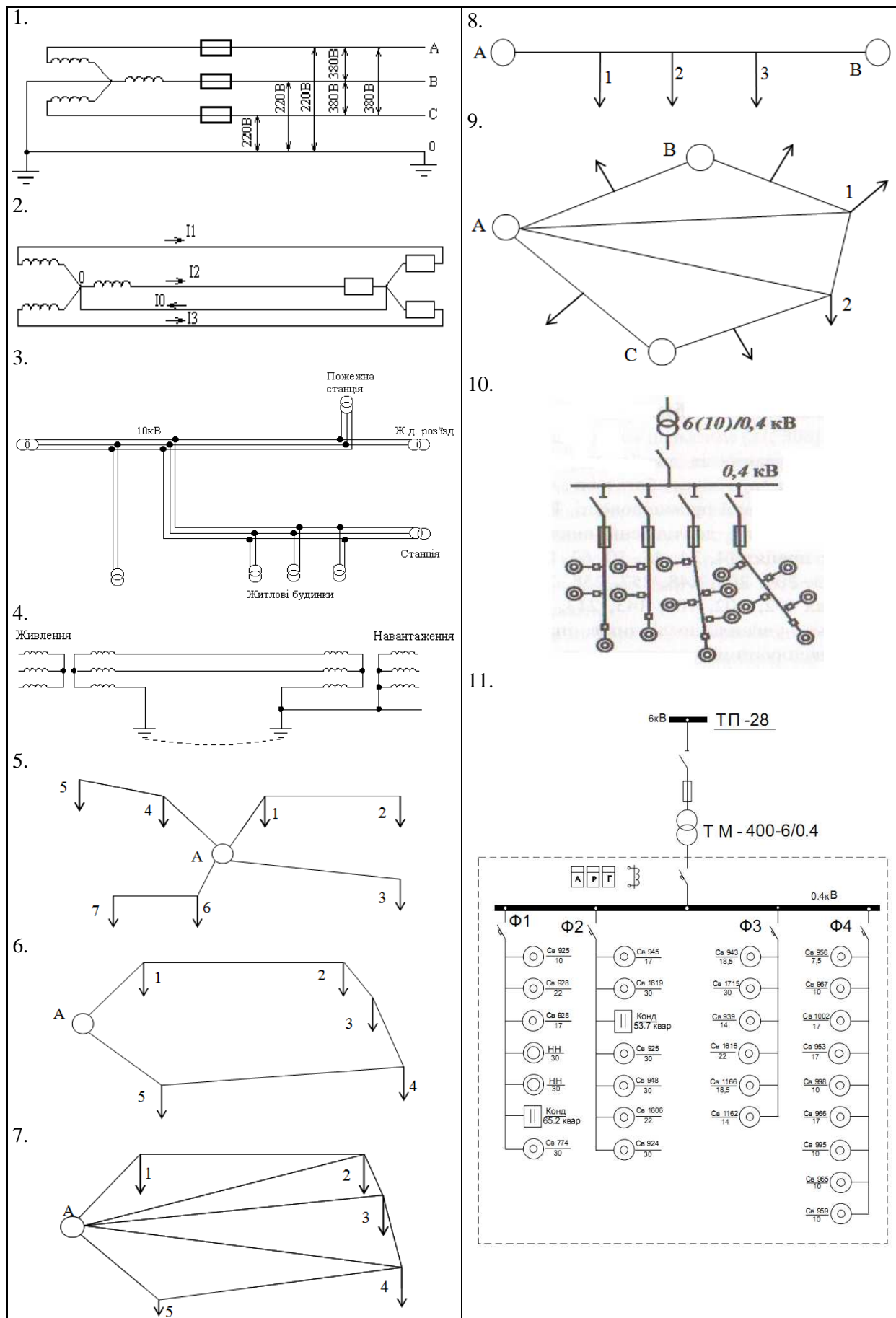
На рис. 4 зображено експериментальні цифрові накиди в електричних мережах при неуспішному запуску потужних електроприводів, які супроводжуються експоненціальними характеристиками змін струмів в електромережі у моменти запуску потужних електроприводів.

2.2. Дослідження спотворень під час виникнення коротких замикань у високовольтних лініях електропередач

Під час міжфазних замикань у високовольтних лініях електропередач виникають стрибки струмів, які не характеризуються значними спотвореннями гармонічних сигналів. Розпізнавання такого типу коротких замикань може бути принципово здійснене на інтервалі 1,5-2 періодів промислової частоти (рис. 7), при трифазовому замиканні.

Міжфазове замикання в момент часу 0,175 с. Замикання між фазами А і В максимум фазової напруги пройшов. Замикання в кінці лінії (рис. 5).

Таблиця 1 – Структури високовольтних електромереж



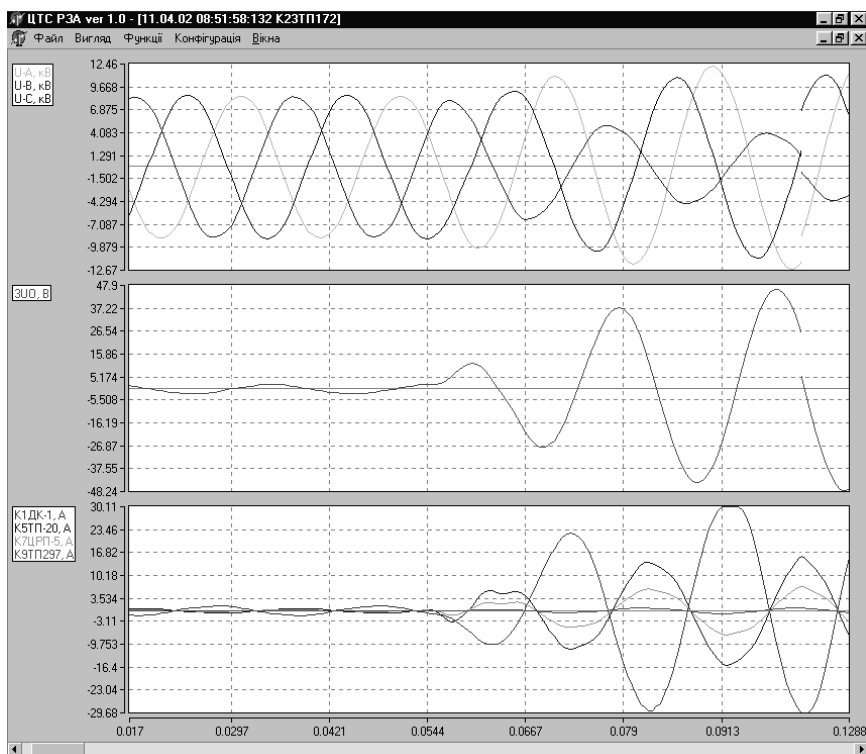


Рисунок 1 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі і струмів при комутації режимів роботи енергосистем

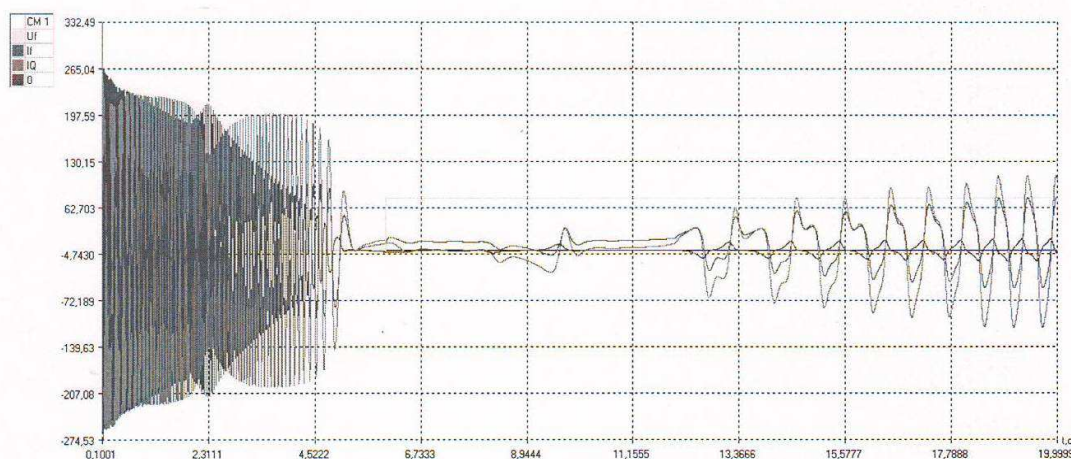


Рисунок 2 – Графіки струмів і напруг нештатної ситуації

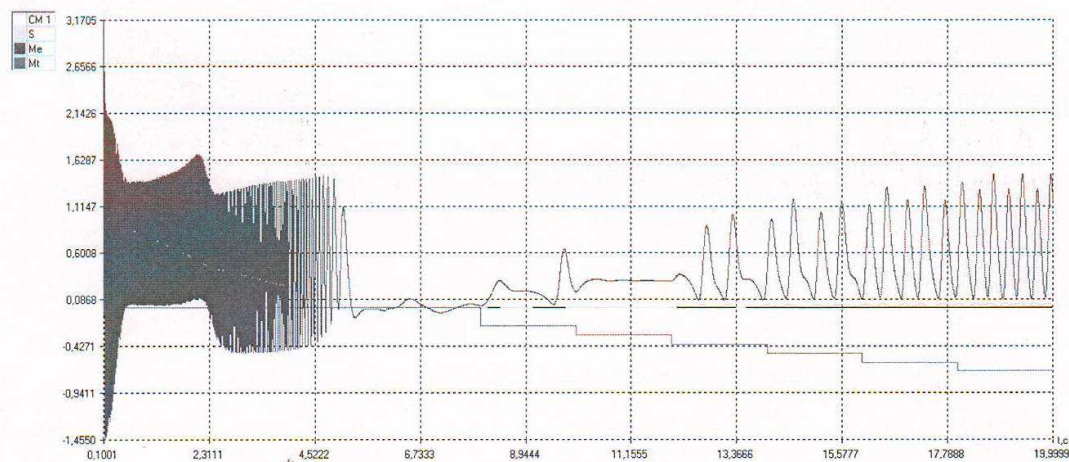


Рисунок 3 – Цифрограми накиду в електромережах

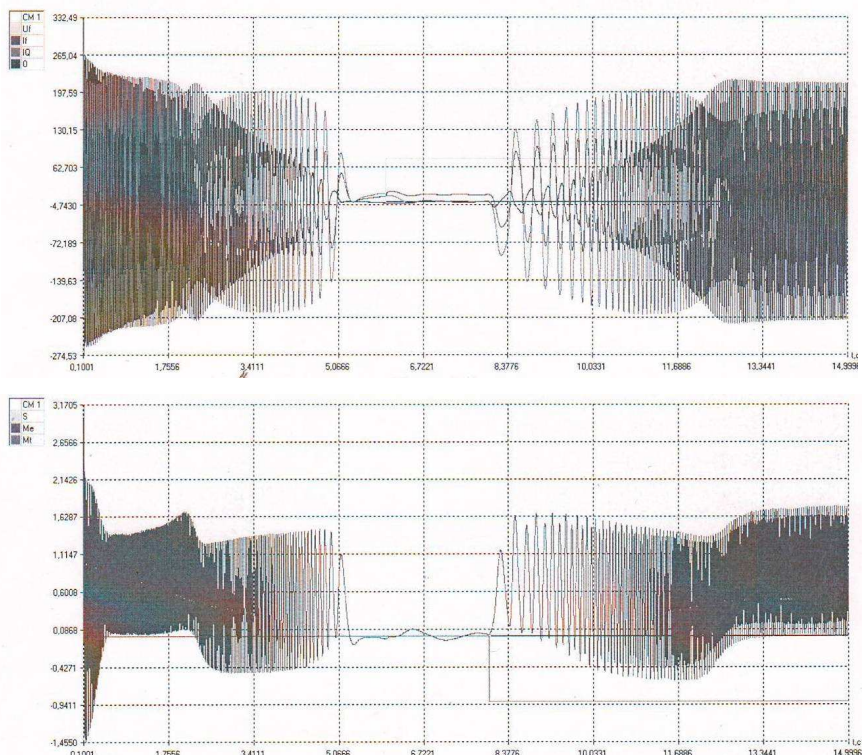


Рисунок 4 – Цифрограми накиду в електричних мережах при неуспішному запуску потужних електроприводів

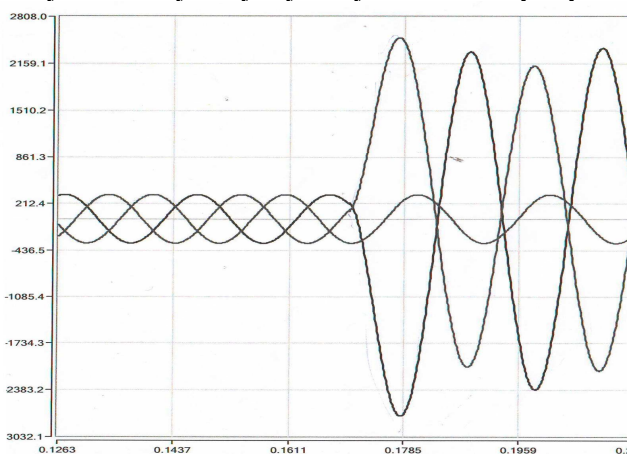


Рисунок 5 – Міжфазове замикання в момент часу 0,175 с

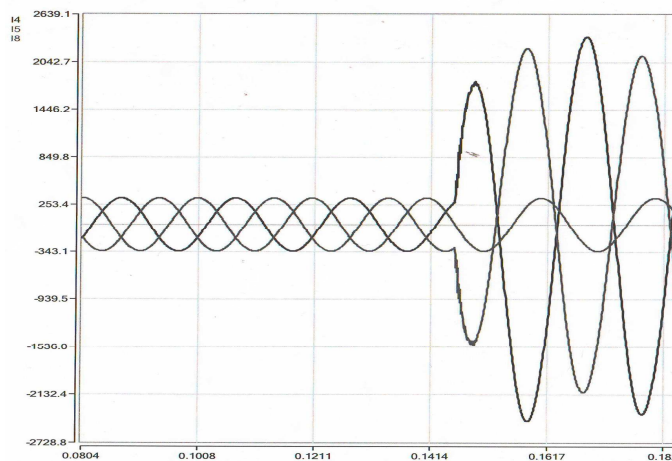


Рисунок 6 – Міжфазове замикання в момент часу 0,1455 с

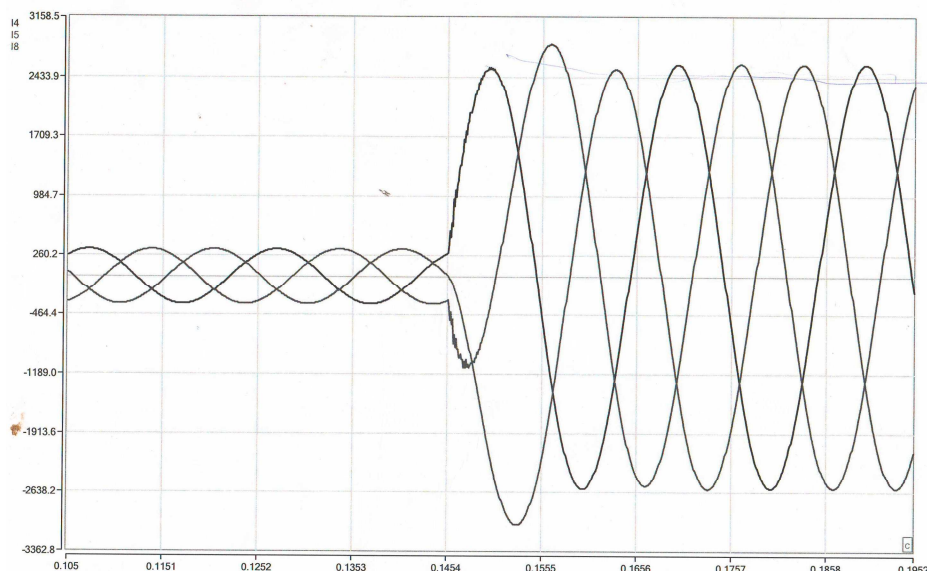


Рисунок 7 – Трифазове замикання в момент часу 0,1455 с

Міжфазове замикання в момент часу 0,1455 с. Замикання між фазами А і В за максимуму фазової напруги. Замикання в кінці лінії (рис. 6).

Трифазове замикання в момент часу 0,1455 с. Замикання в кінці лінії (рис. 7).

Замикання на землю в розподілених мережах 6–35 кВ з промисловою частотою 50 Гц складають приблизно 75% від загальної кількості пошкоджень. В мережах з ізольованою нейтраллю замикання однієї фази на землю (рис. 8) не є аварією [1, 4]. Проте із збільшенням протяжності електричної мережі збільшується їх ємність; при цьому зростають струми на землю. Струм в місцях пошкоджень, виділяє багато тепла, руйнуючи при цьому струмопровідне обладнання і ізоляцію. Як показує досвід, однофазове замикання через невеликий проміжок часу, а деколи й миттєво переходить в двофазове чи трифазове замикання, і, як наслідок, порушується загальне електропостачання (рис. 9).

На рис. 10 – 12 видно, що під час виникнення коротких замикань відбувається значне спотворення гармонічних сигналів, а амплітуди різких стрибків струмів експоненціально зменшуються в процесі розвитку короткого замикання.

2.3 Перехідні процеси при одноразовому та багаторазовому пробіі ізоляції

2.3.1 Короткочасний пробій ізоляції

На рисунку 13 подано графіки струмів і напруг при короткочасному пробіі ізоляції.

2.3.2 Замикання через однополярну несиметричну дугу (рис. 14)

2.3.3 Замикання через двополярну дугу

На рисунку 15 спостерігаємо перехід від стану однополярної в двополярну, а на рисунку 16 зображено стан симетричної двополярної дуги.

2.3.4 Однофазове замикання на землю

Графіки напруг зображено на рисунках 17 та 18.

2.3.5 Замикання між двома фазами

На рисунках 19 та 20 зображено стани міжфазових замикань двох фаз.

Проведені дослідження показують, що серед запропонованих методів розпізнавання перехідних процесів в енергетичній системі даним умовам реалізації алгоритму відповідає метод інтегрального диференціально-різницевого розпізнавання та ідентифікації збурень та накидів у високовольтних електромережах.

3. Релейний захист

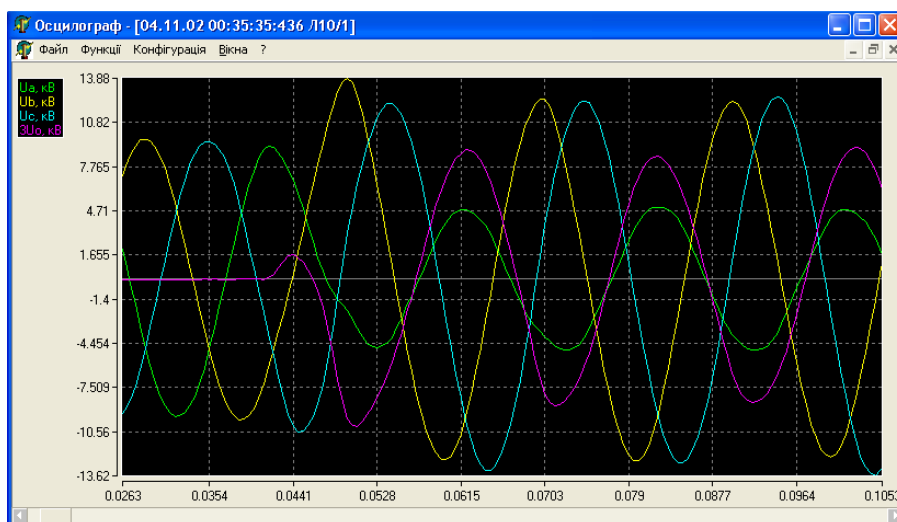
Аналіз характеристик відомих пристроїв захисту обладнання високовольтних ЛЕП від накидів та коротких замикань.

Існуючі електроенергетичні системи є складними комплексами електротехнічного обладнання, яке розподілено розміщене на великих територіях, в яких з великою ймовірністю виникають збурення та вихід з ладу промислових засобів генерування, транспортування та споживання електроенергії.

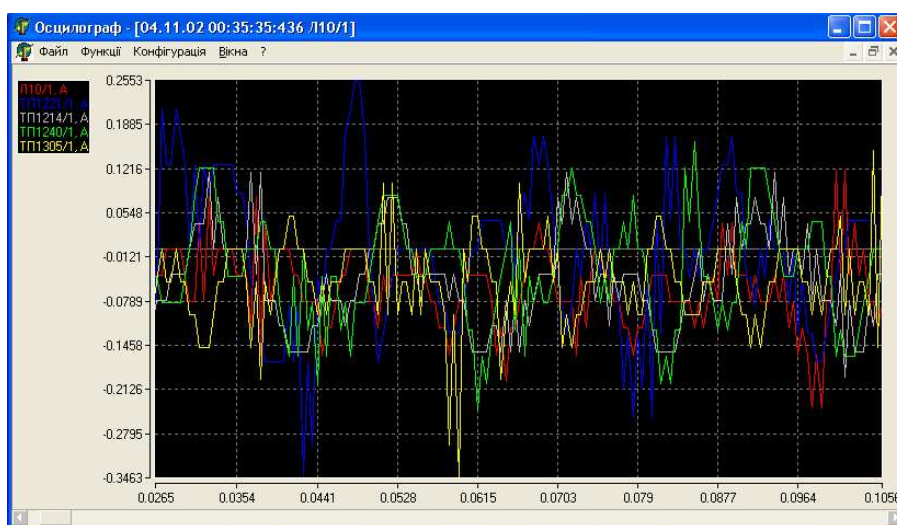
Найбільш небезпечним в ЛЕП є замикання на землю, які можуть призводити до:

- виведення з ладу електротехнічного обладнання внаслідок його дугового руйнування;
- виведення з ладу обладнання електроспоживання;
- пониження рівня напруги чи робочого струму, що спричиняє порушення технологічних процесів на підприємствах.

Одним з найпоширеніших пристроїв захисту високовольтного електротехнічного обладнання є реле струму (РС) [1, 13], функціональна схема та гістерезисна характеристика якого показана на рис. 21.



а)



б)

Рисунок 8 – Діаграми фазових напруг та напруги в нейтралі (а) та струмів у лініях при однофазовому замиканні на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю (б)

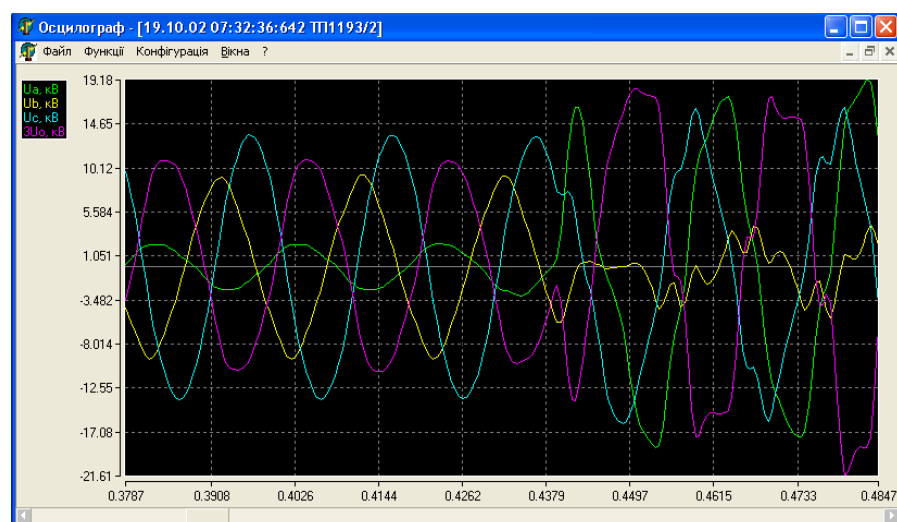


Рисунок 9 – Графіки фазових напруг та напруги в нейтралі при переході однофазового замикання в двофазове з виникненням електричної дуги

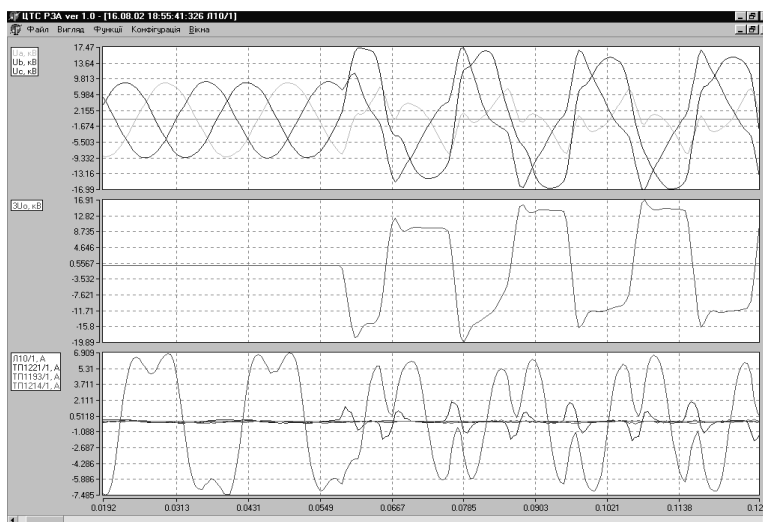


Рисунок 10 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при переході нормального режиму роботи в двополярну дугу

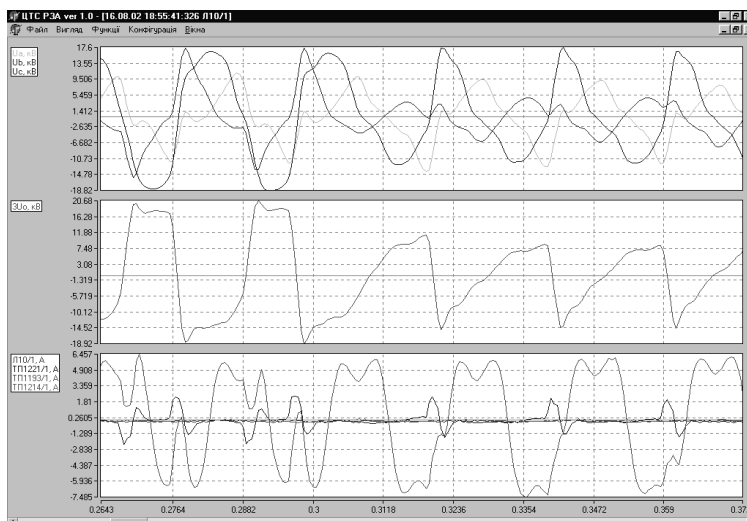


Рисунок 11 – На часовому проміжку [0,3; 0,92] спостерігаємо однополярну несиметричну дугу

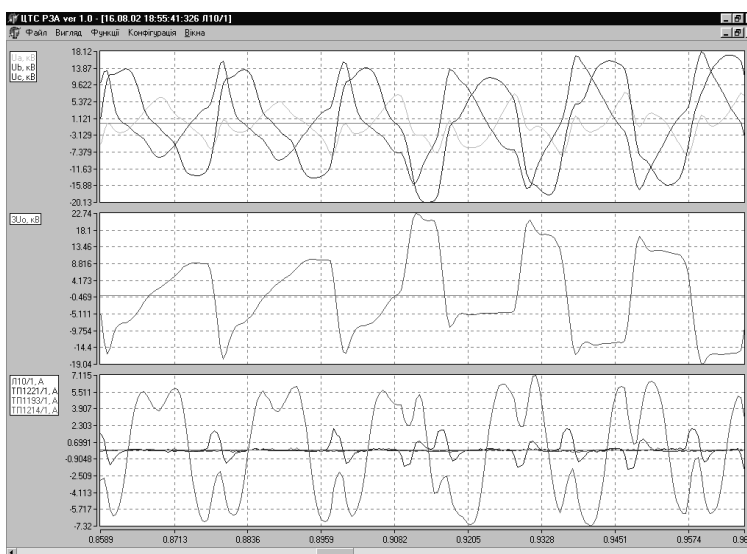


Рисунок 12 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при двофазовій симетричній дузі, яка починається з моменту часу 0,92

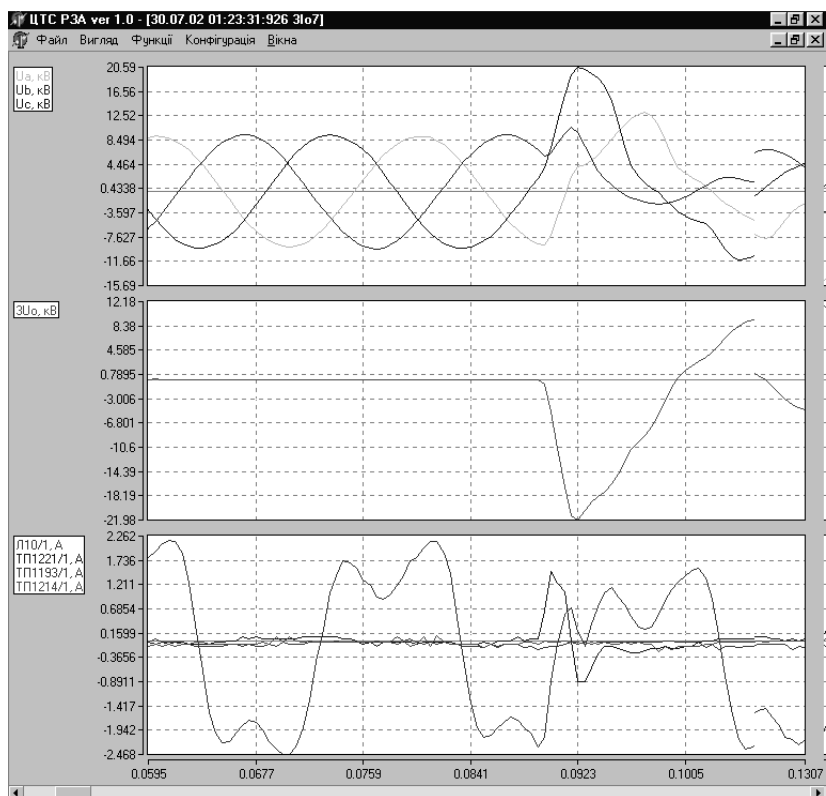


Рисунок 13 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при короткочасному пробой ізоляції

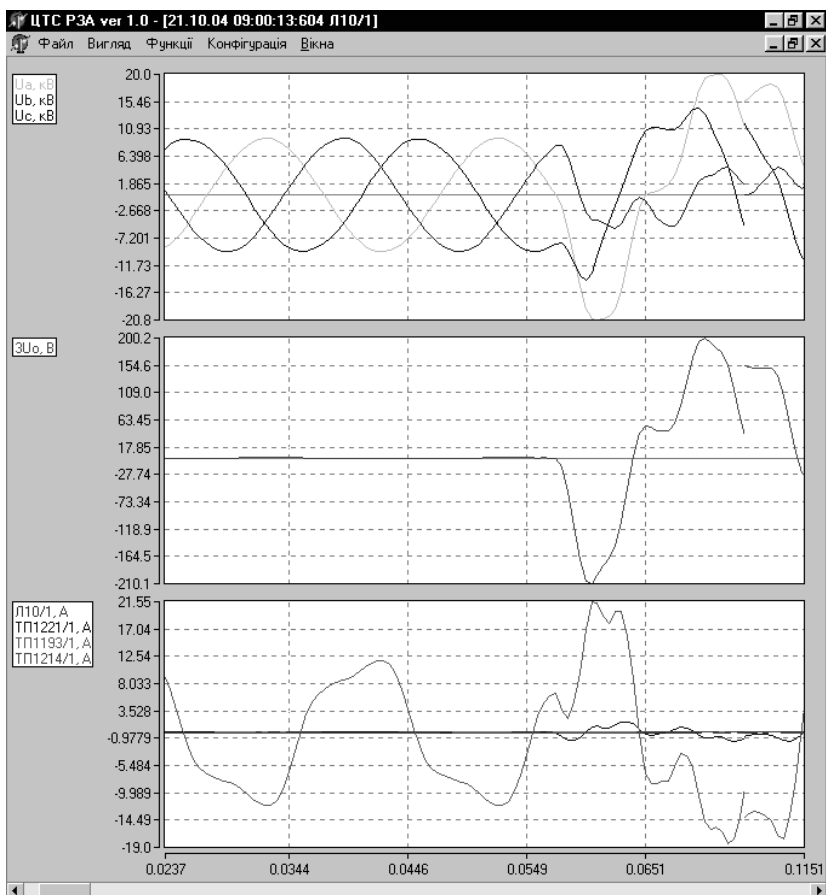


Рисунок 14 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при замиканні через однополярну несиметричну дугу

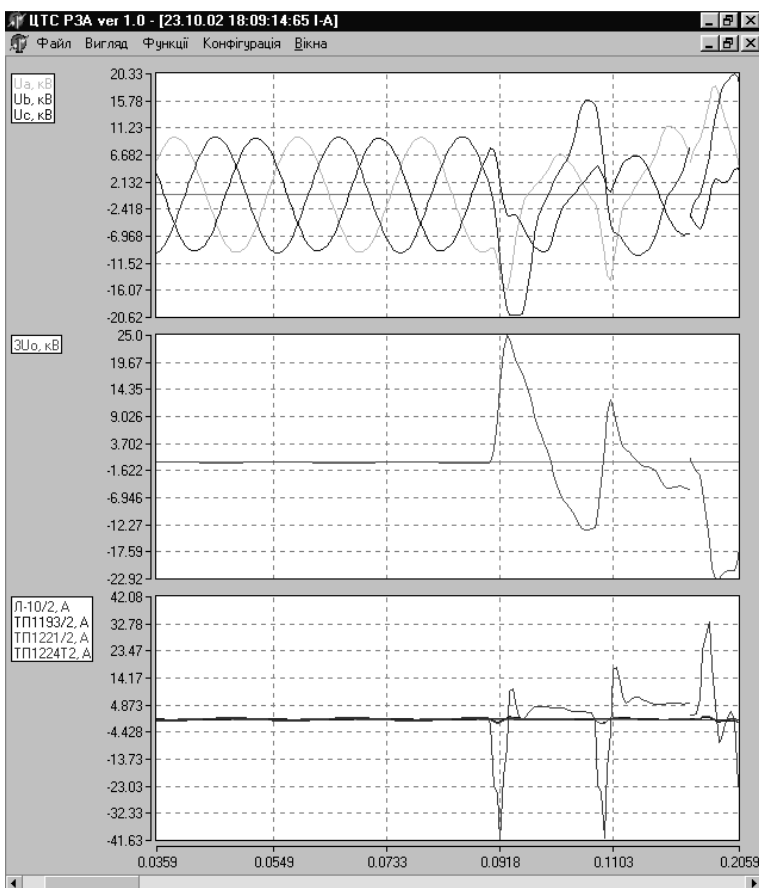


Рисунок 15 – Графіки координат фазових напруг, напруг у нейтралі та струмів при замиканні через однополярну несиметричну дугу з переходом у двополярну дугу

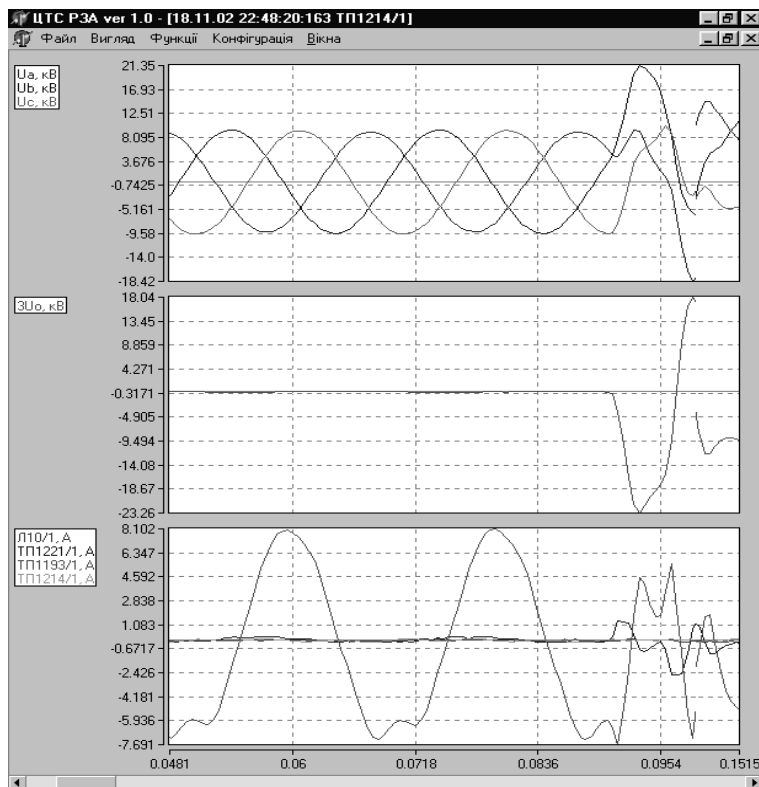


Рисунок 16 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при замиканні через симетричну двополярну дугу

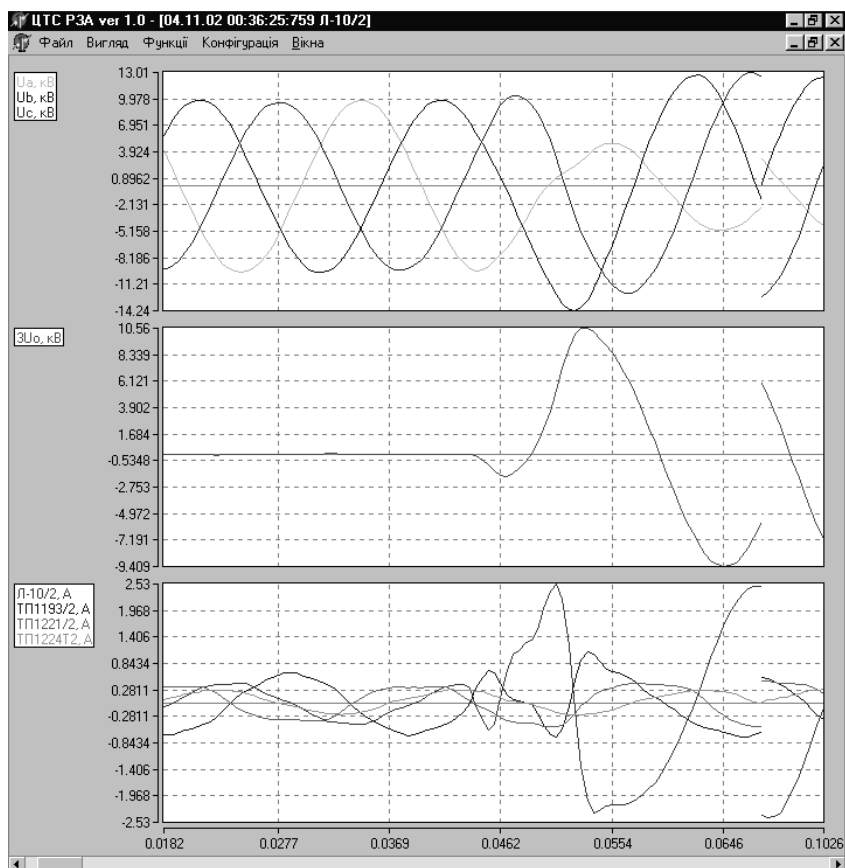


Рисунок 17 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при однофазному замиканні на землю в мережі з ізольованою нейтраллю

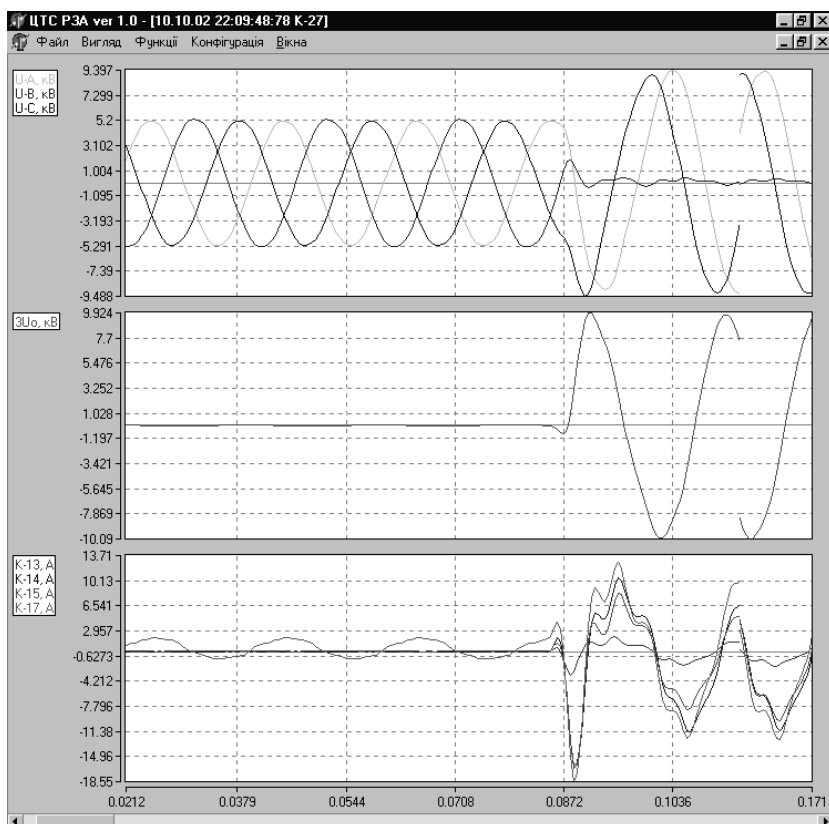


Рисунок 18 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при однофазовому замиканні на землю в компенсованій нейтралі

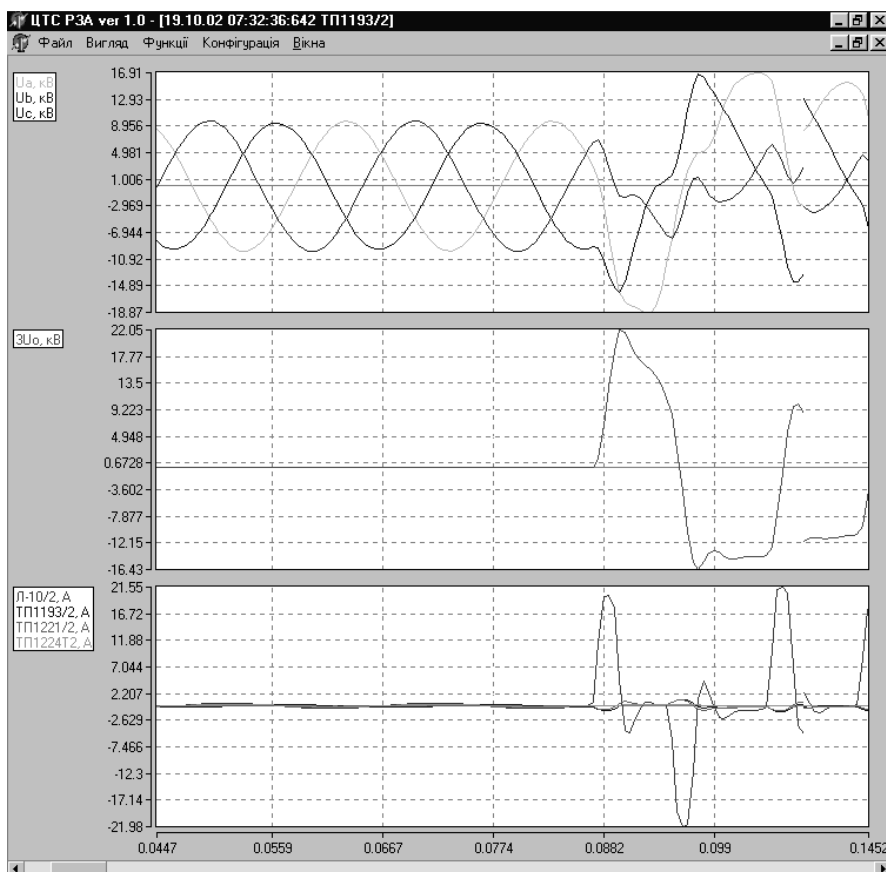


Рисунок 19 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при переході від нормального режиму роботи до аварійного пробую у фазі b

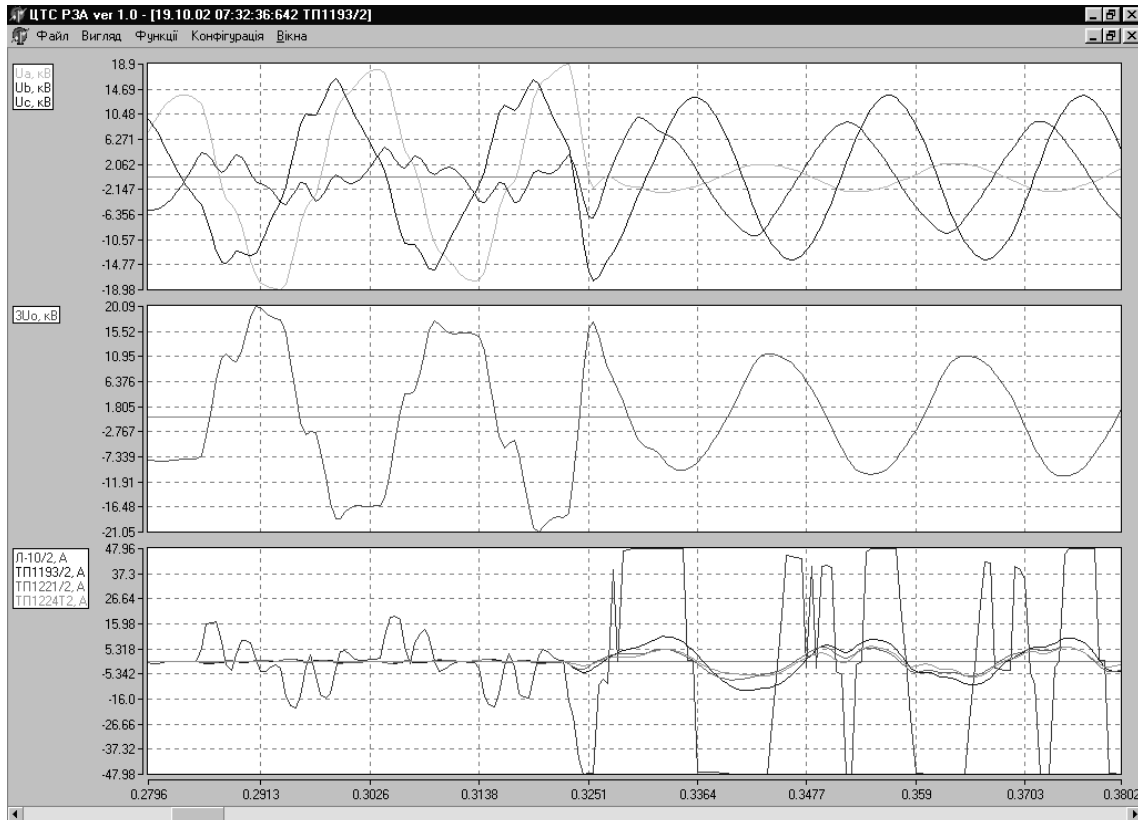


Рисунок 20 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі та струмів при двофазовому замиканні двох фаз

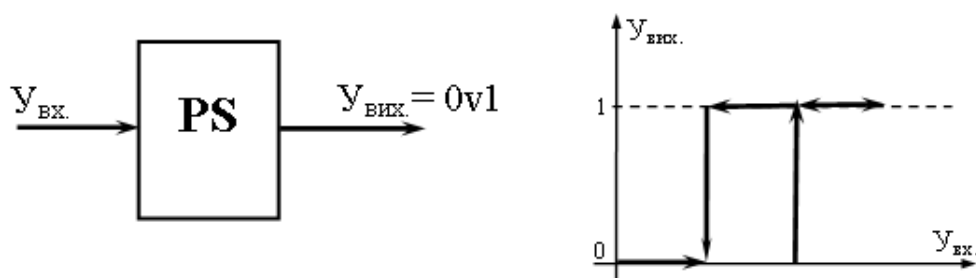


Рисунок 21 – Функціональна схема та гістерезисна характеристика реле струму

Гістерезисну характеристику РС визначають коефіцієнтом повернення:

$$k_p = \frac{Y_p}{Y_c},$$

де $Y_p = Y_{вх}$, яке є меншим від величини вхідного струму, за якого РС спрацьовує, причому $Y_p < Y_c$;

$Y_p = Y_{вх}$ – уставка значення струму, при якому спрацьовує РС.

На практиці існують і розрізняють реле максимальної дії $k_p < 1$ та реле мінімальної дії $k_p > 1$.

Класифікація засобів та типів РС, які використовуються у сучасних системах релейного захисту обладнання ЛЕП, наведена в роботі [7].

Успішний розвиток мікроелектроніки створив умови для розвитку та широкого впровадження мікроконтролерних мікропроцесорних та спецпроцесорних засобів захисту обладнання ЛЕП від коротких замикань та накидів.

За останні два десятиліття років в Україні впроваджено засоби релейного захисту, виконані на основі цифрових принципів опрацювання сигналів та розпізнавання образів.

Відомі зарубіжні фірми: ABB, Siemens, Alstom, General Electric, Schneider, Areva, Nari, Vamp та інші серійно випускають та масово впроваджують мікроконтролерні засоби релейного захисту ЛЕП.

В Україні такими виробниками є: Київприлад, Радіус Автоматика, ІМСКОЕ та ін.

Мікроконтролерні засоби релейного захисту мають такі основні переваги:

вища точність (до 2%) відтворення заданих характеристик функціонування засобу релейного захисту;

забезпечення коефіцієнта повернення (до 0,99), що потребує складних технічних рішень в інших типах пристроїв релейного захисту;

реалізація програмним шляхом характеристик спрацювання будь-якої складності;

запам'ятовування координат режиму у момент спрацювання цифрового пристрою;

можливість оперативного (в тому числі дистанційного) алгоритму опрацювання сигналів;

універсальність застосування при вирішенні різних задач захисту від перевантажень та коротких замикань у технологічному обладнанні ЛЕП;

менші габарити та затрати на монтажні роботи;

можливість самодіагностики та моніторинг надійності;

менше енергоспоживання, що суттєво зменшує потужність джерел енергії оперативного струму;

менші експлуатаційні затрати на профілактичні роботи, які виконуються шляхом тестування програмного забезпечення.

Досвід експлуатації дозволив встановити також недоліки та функціональні обмеження пристроїв такого класу:

зниження надійності та довговічності, обумовлене характеристиками безвідмовності базових компонентів мікроконтролерних реалізацій: АЦП, мікропроцесора, інтерфейсів вводу/виводу та живлення;

значна концентрація в одному пристрої багатьох важливих функцій моніторингу стану промислового обладнання ЛЕП, наприклад потужних трансформаторів.

Всі цифрові пристрої релейного захисту незалежно від призначення мають схожу структуру [7, 10]. Процесор є основним елементом цифрового захисту, в якому реалізований алгоритм роботи конкретного захисту. Іноді застосовується один або декілька процесорів (в залежності від призначення пристрою та фірми виробника). Відома фірма ABB надає перевагу багатопроекторним системам, в яких кожен процесор виконує конкретні завдання алгоритму, і ці процесори працюють одночасно. Така робота забезпечує потрібну швидкість і точність. Інші фірми застосовують потужні однопроекторні системи, для забезпечення потрібних характеристик. Оскільки пристрої релейного захисту працюють у важких умовах експлуатації, застосовують спеціальні індустриальні процесори, які можуть працювати за температури навколишнього середовища від мінус 30 до +50 °С, та відносної вологості до 80%. Процесор має зв'язок з об'єктом захисту через кола вводу та виводу.

Вхідною інформацією є аналогові сигнали – струми, напруги, температура тощо та бінарні – положення комутаційних апаратів, стан вихідних реле інших пристроїв релейного захисту та автоматики [6, 8, 9].

Вихідними сигналами цифрових захистів є традиційно бінарні сигнали. Ці сигнали надходять після спрацювання цифрового захисту в колах керування та в колах сигналізації електроенергетичної системи.

4 Теоретичні засади методів розпізнавання збурень типу накидів та коротких замикань у високовольтних лініях електропередач

4.1 Диференціально-різницевий алгоритм розпізнавання короткого накиду та короткого замикання

Виходячи з умови задачі, шукану величину знаходимо у вигляді:

$$H(t) = |S_1(t)| - |S_0(t)|.$$

На основі розрахунку інтегральних алгоритмів можна записати:

$$S_1(t) = \int_j^{\frac{\pi}{2}+j} S(t)dt, \dots, S_0(t) = \int_{\frac{\pi}{2}+j}^{\pi+j} S(t)dt,$$

де $j = n \cdot \frac{\pi}{2}$, $n=0, 1, 2, \dots$

Звідси

$$H(t) = |S_1(t)| - |S_0(t)| = \left| \int_j^{\frac{\pi}{2}+j} S(t)dt \right| - \left| \int_{\frac{\pi}{2}+j}^{\pi+j} S(t)dt \right|.$$

Також дане рівняння можна представити з використанням сум Дарбу. Тобто

$$S_1(t) = \Delta t \cdot \sum_{i=j}^{\frac{\pi}{2}+j} S_i(\Delta t),$$

де $\Delta t = \frac{\pi}{2}$.

Отже, шукане рівняння набуде вигляду:

$$H(t) = \Delta t \cdot \left| \sum_{i=j}^{\frac{\pi}{2}+j} S_i(\Delta t) \right| - \Delta t \cdot \left| \sum_{k=\frac{\pi}{2}+j}^{\pi+j} S_k(\Delta t) \right| = \Delta t \cdot \left(\left| \sum_{i=j}^{\frac{\pi}{2}+j} S_i(\Delta t) \right| - \left| \sum_{k=\frac{\pi}{2}+j}^{\pi+j} S_k(\Delta t) \right| \right).$$

Якщо значення знайдених рівностей дорівнюють нулю, то процеси, які відбуваються в системі, є стабільними.

Коли ж $H(t) > 0$, тоді відбуваються певні нерівноважні процеси, що вказує на виникнення передаварійних станів у системі.

Для аналогових процесів $H(t) = S'(t)$.

Для дискретних процесів

$$H_j^0 = \frac{S_{j+\frac{\pi}{2}} - S_j}{\Delta t}, H_j^1 = \frac{S_{j+\pi} - S_{j+\frac{\pi}{2}}}{\Delta t},$$

де $\Delta t = \frac{\pi}{2}$, $j = n \cdot \frac{\pi}{2}$, $n=0, 1, 2, \dots$

Звідси

$$H(t) = |H_j^1| - |H_j^0| = \left| \frac{S_{j+\pi} - S_{j+\frac{\pi}{2}}}{\Delta t} \right| - \left| \frac{S_{j+\frac{\pi}{2}} - S_j}{\Delta t} \right|.$$

Якщо значення знайдених рівностей дорівнюють нулю, то процеси, які відбуваються в системі, є стабільними.

Коли ж $H(t) > 0$, тоді відбуваються певні нерівноважні процеси, що вказує на виникнення передаварійних станів у системі.

Графіки програмного моделювання накиду та короткого замикання наведені на рис. 22 – 23.

4.2 Розпізнавання спотворень гармонічних сигналів методом рандомізації

Діагностування та розпізнавання спотворень гармонічних сигналів у високовольтних лініях електропередач (ЛЕП) найчастіше виконується на основі спектрального аналізу та методу найменших квадратів Байєсівського підходу [4].

Обчислення наявності спотворюючих гармонік спектральним аналізом та методом найменших квадратів характеризується великою алгоритмічною, часовою та апаратною складністю, а також потребує великої вибірки – більше 10-15 періодів сигналів промислової частоти.

Названі функціональні обмеження вказані через методи неможливо практично застосовувати при швидкісному моніторингу та розпізнаванні накидів та коротких замикань у високовольтних ЛЕП. Застосування нелінійного перетворення гармонічних сигналів на основі їх рандомізації (хещування) дозволяє суттєво зменшити об'єм вибірки та підвищити швидкість діагностування збурень та оцінки якості електричної енергії.

Рандомізація (англ. random – випадковий, нерегулярний, безпорядковий) – це нелінійна процедура навмисного внесення “випадковості” або шумоподібності в обробку вибірових даних. Рандомізація полягає в перемішуванні інформаційної вибірки відповідно до певного закону.

Оператором рандомізації \mathfrak{Ran} послідовності $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ є дія, яка полягає в переміщенні i -го елемента на місце j -го елемента послідовності X . Відповідність між i та j реалізується законом рандомізації [5]:

$$X = \{x_i\}, \quad \mathfrak{Ran}(X) = \mathfrak{Ran}(\{x_i\}) = X^{\mathfrak{Ran}}, \\ X^{\mathfrak{Ran}} = \{x_j\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = k_i.$$

$K = \{k_i\}$ – масив-ключ (закон) процедури рандомізації \mathfrak{Ran} .

Рандомізація виконується над кожним елементом послідовності X . При цьому i -й елемент послідовності X переміщується на місце $\mathfrak{Ran}(x_i)$, згідно з наступним виразом:

$$\mathfrak{Ran}(X) = (\mathfrak{Ran}(x_0), \mathfrak{Ran}(x_1), \dots, \mathfrak{Ran}(x_i), \dots, \mathfrak{Ran}(x_n)).$$

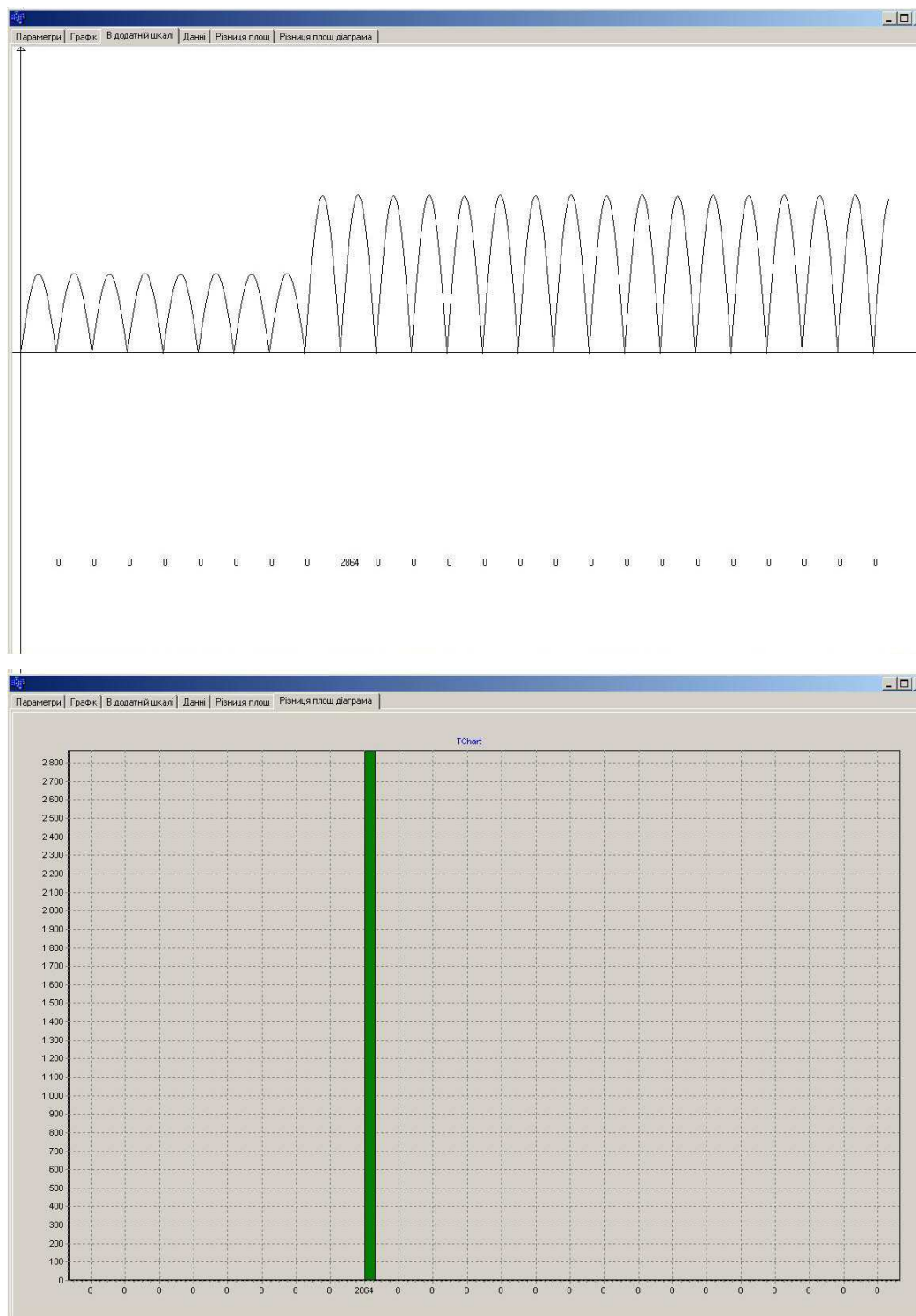


Рисунок 22 – Програмне моделювання розпізнавання накиду

В результаті рандомізації послідовності X утворюється послідовність $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$, причому $x_i = y_j$, $i = 1, n, j = 1, m$.

Застосування більшості із N ключів рандомізації не є практично ефективним. Проте серед них є ключі, застосування яких дозволяє виконувати наступні операції: сортування послідовності, за зростанням; сортування послі-

довності за спаданням; утворення сигналу типу “білий шум”; перетворення сигналу одної форми в сигнал цілісної форми; збільшення або зменшення частоти гармонічного сигналу.

Особливе значення мають перетворення на основі рандомізації гармонічних сигналів у шумоподібні, які характеризуються унікальними властивостями автокореляційних функцій і широко застосовуються для завадостійкого передавання інформації.

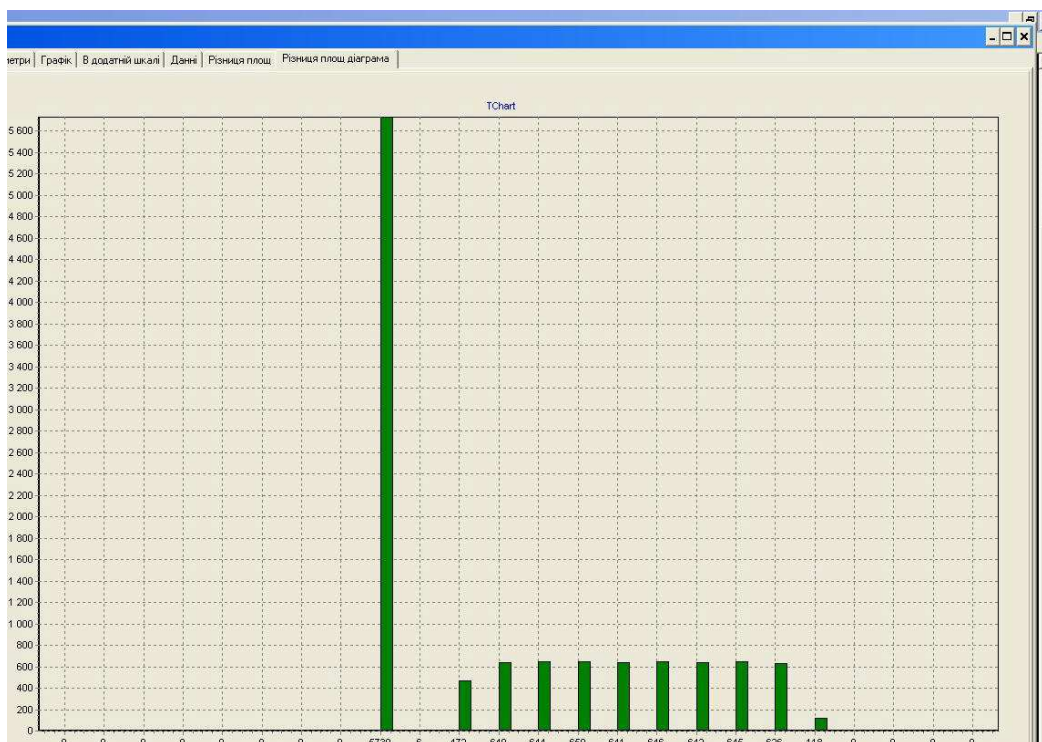
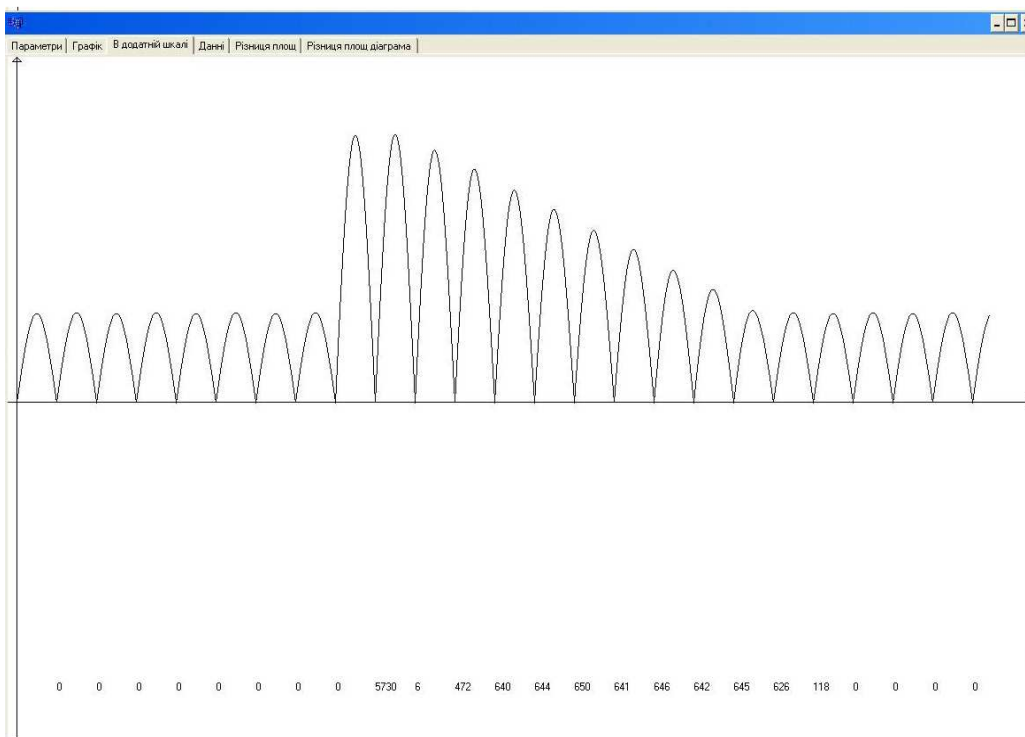


Рисунок 23 – Програмного моделювання розпізнавання короткого замикання

Розглянемо сигнальну рандомізацію одного періоду синусоїди $x_i = \sin\left(\frac{2\pi i}{70}\right)$, де $i = \overline{1, 70}$, з приведенням її до форми М-послідовності довжиною $n = 7$ біт, яка записується у вигляді 1110100. Оскільки кількість відліків синусоїди більша за кількість бітів М-послідовності, необхідно здійснити розширення М-послідовності з коефіцієнтом $k = 10$, тобто кожен інформа-

ційний біт записувати 10 разів. При цьому утворена послідовність матиме довжину $n \cdot k = 70$ біт.

При сигнальній рандомізації виконується переміщення дискретизованих значень синусоїди x_i з метою отримання форми огинаючої, максимально близької до М-послідовності (рис. 24).

На рисунку 24 зображено графік рандомізованого сигналу синусоїди з ваговими коефіцієнтами. Як бачимо, рандомізований сигнал і М-последовність збігаються, а отже, автокореляційна функція (АКФ) рандомізованого сигналу і АКФ М-последовності однакові.

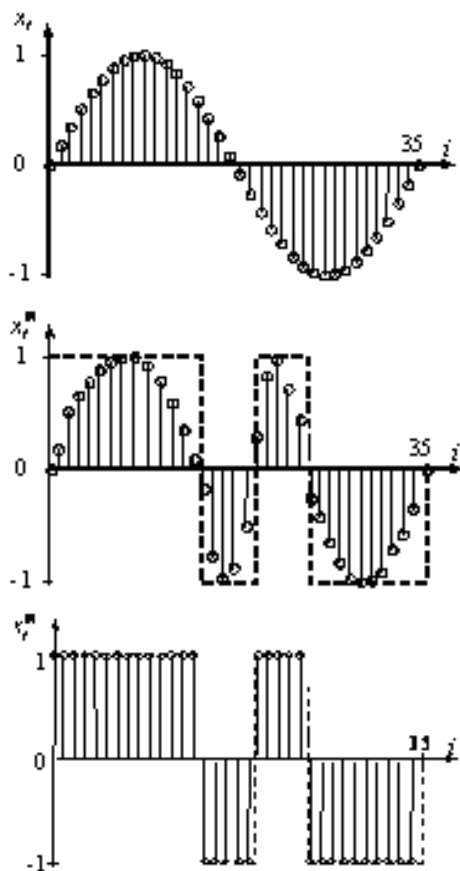


Рисунок 24 – Сигнальна рандомізація синусоїди та рандомізована последовність

Описаний метод рандомізації синусоїдального сигналу та його кореляційної згортки дозволяє його застосувати для ідентифікації та розпізнавання збурень в лініях електропередач при виникненні коротких замикань та накидів. При цьому у випадку виникнення накиду характеристики зміни гармонічного сигналу незалежно від стрибків амплітуди спектрально не змінюються і в результаті кореляційної згортки виникає один пік кореляційного максимуму.

У випадку виникнення короткого замикання спостерігається спотворення гармонічного сигналу, а також з'являється експоненціальна складова його затухання, що приводить до суттєвої зміни спектральних характеристик рандомізованого сигналу. Тому в результаті опрацювання таких збурень в електромережах відбувається різке зменшення амплітуди головного піку та поява інших піків кореляційної функції, що використовується для ідентифікації даного виду збурень в електромережі.

На рисунку 25 показано кореляційні функції неспотвореного гармонічного сигналу, а також АКФ шуму і корисного сигналу.

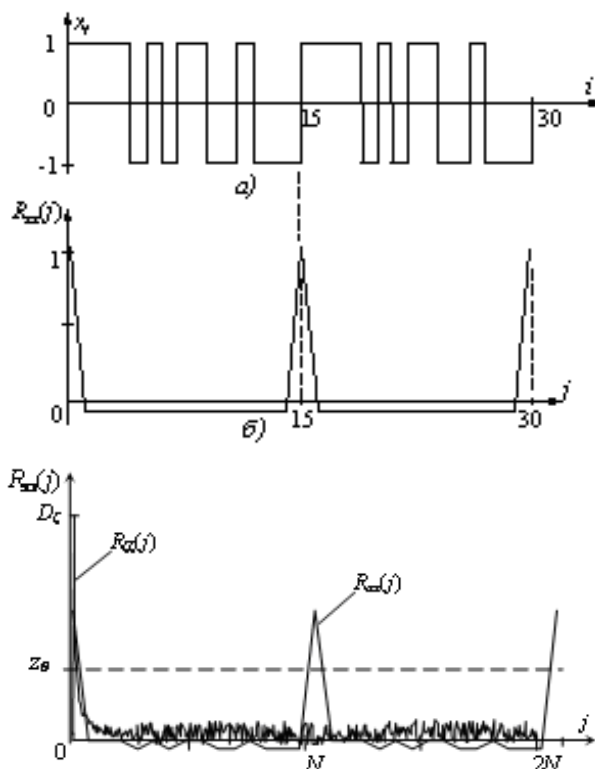


Рисунок 25 – Гармонічний сигнал без спотворень, АКФ шуму і корисного сигналу

Розроблений метод рандомізації гармонічних сигналів за рахунок виконання нелінійної операції їх перетворення в АКФ з особливими кореляційними характеристиками дозволяє реалізувати швидкісний (на інтервалі 1-2 періодів) моніторинг якості електроенергії та виконати розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП.

4.3 Метод розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП на основі квадратично-імпульсного перетворення спецпроцесора з нейрокомпонентами

Актуальною задачею при створенні сучасних інформаційних систем контролю технологічних параметрів та створенні приладів контролю якості є розробка теоретичних засад кореляційного опрацювання гармонічних сигналів, які описують технологічні параметри об'єктів. Особливо важливою задачею розпізнавання гармонічних сигналів є ідентифікація їх спотворень у високовольтних енергетичних системах при виникненні коротких замикань, що приводить до зміни їх кореляційних та спектральних характеристик. Успішне вирішення такої задачі може бути досягнуто на основі квадратично-імпульсного перетворення спецпроцесорами з нейрокомпонентами.

На рис. 26 зображено структуру кореляційного спецпроцесора на основі моделі рекурентного нейрона, яка є найбільш адекватною для формалізації і моделювання біологічного нейрона [2]. Представлена структура призначена для розпізнавання гармонічних сигналів, де $x(t)$ – вхідний сигнал; a_1, a_2, \dots – вагові коефі-

цієнти; $Z(t)$ – вихідний сигнал; Φ – пристрій формування імпульсів [3]; a, b, \dots, h – моменти часу формування імпульсів,

де Z_i - функція реакції нейрона на вхідний сигнал x_i ,

α_i - ваговий коефіцієнт,

p – порогове значення,

H_i - вихідний сигнал.

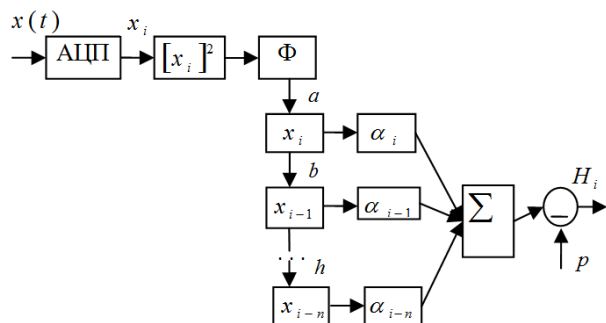


Рисунок 26 – Структура кореляційного нейропроцесора для розпізнавання гармонічних сигналів промислової частоти високовольтних ЛЕП на основі моделі рекурентного нейрона

В результаті опрацювання імпульсного потоку сигналів, який формується на виході формувача імпульсів процесором зі структурою рекурентного нейрона (рис. 26), отримується сигнальний імпульсний код, наведений на рис. 27.

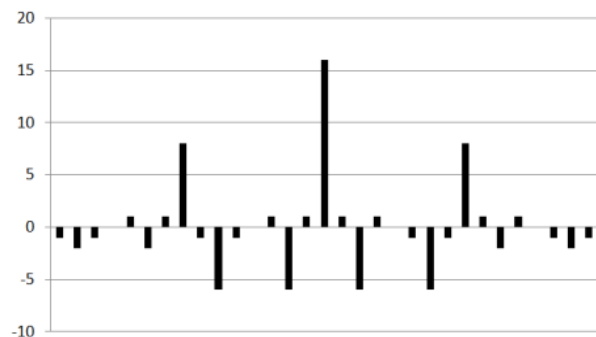


Рисунок 27 – Результат згортання коду, який формується квадратично-імпульсним перетворювачем

Аналіз результату згортки такого імпульсного коду показує, що гармонічний сигнал на одному періоді в площині додатних значень представляється трьома найбільш активними імпульсними відгукками, кожен з яких виникає на інтервалі $1/4, 1/2$ і $3/4$ періоду вхідного гармонічного сигналу. Характеристики такого імпульсного потоку наближаються до характеристик шумоподібних сигналів, які широко застосовуються в системах передавання даних на основі М-сигналів та кодів Баркера і характеризуються покращеними властивостями виявлення та розпізнавання модульованих та маніпульованих сигналів. Такі властивості можуть бути ефективно використані для опрацювання гармонічних сигналів в енергетиці та розпізнавання їх пошкоджень при виникненні коротких замикань та інших перехідних процесів у високовольтних лініях.

Згортка сигнального коду, подана на рисунку 27, що отримана в результаті опрацювання гармонічного сигналу рекурентним нейроном, враховує одиничні вагові коефіцієнти в структурі моделі нейрона.

В результаті досліджень, спрямованих на покращення характеристик дискретного квадратично-імпульсного перетворення гармонічного сигналу шляхом підбору найбільш вдалих вагових коефіцієнтів, отримані результати, подані на рисунку 28.

На рисунку 29 показані приклади зміни часових характеристик гармонічних сигналів при:
а) стрибкоподібній зміні навантаження та споживаної потужності, що відображається пропорційною зміною амплітуди споживаного струму $I(t)$;

б) виникненні короткого замикання та перехідного процесу внаслідок комутаційних переключень в лініях електропередачі, причому:

$$x_1(t) = y_1(t) = A_1 \sin wt ; x_2(t) = A_2 \sin wt ;$$

$$y_2(t) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \sin wt ; x_3(t) = y_3(t) = A_3 \sin wt$$

На рисунку 30 показана згортка сигналу, отриманого в результаті короткого замикання на високовольтній електричній мережі. Вона суттєво відрізняється від згортки еталонних гармонічних сигналів, що дає змогу ідентифікувати коротке замикання.

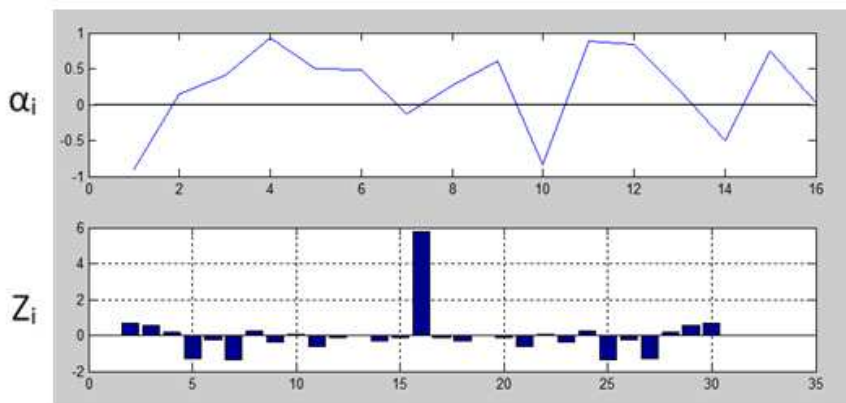
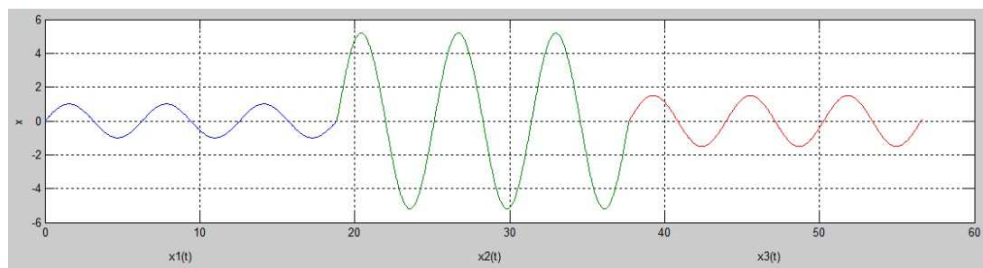
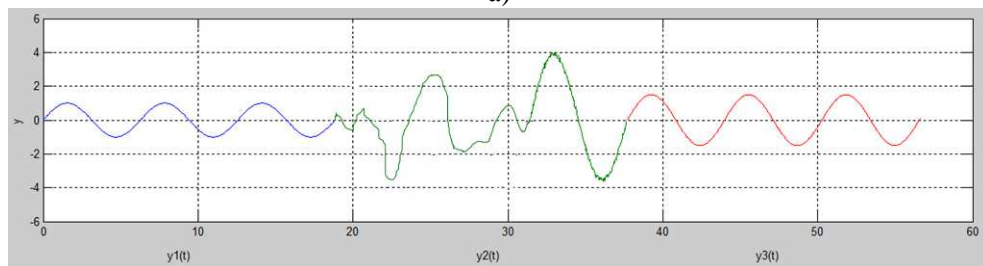


Рисунок 28 – Результат підбору оптимальних вагових коефіцієнтів α



а)



б)

Рисунок 29 – Приклади зміни часових характеристик гармонічних сигналів при стрибкоподібній зміні навантаження та споживаної потужності (а) та виникненні короткого замикання (б)

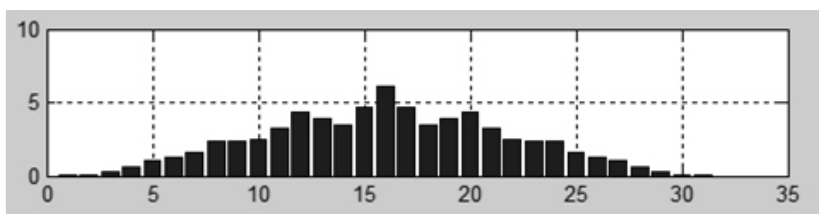


Рисунок 30 – Згортка сигналу, отриманого в результаті короткого замикання на високовольтній електричній мережі

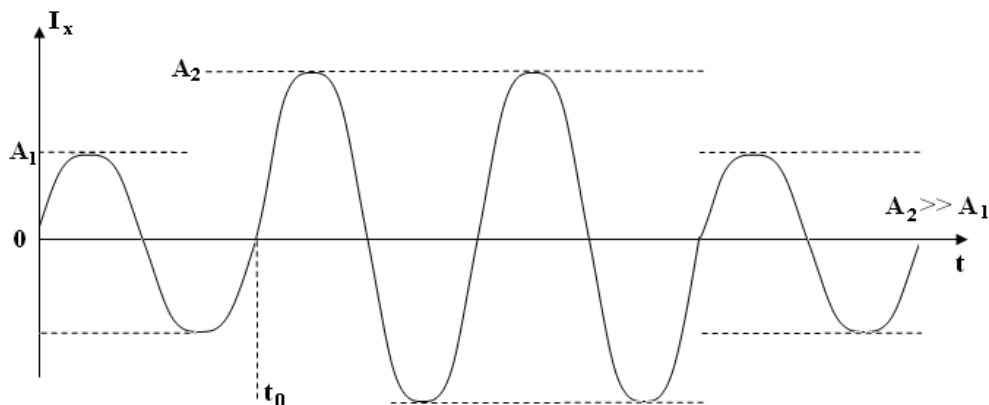


Рисунок 31 – Модель накиду струму при підключенні у момент t_0 потужного споживача

Дослідивши згортку сигналів, поданих на (рис. 30), були отримані результати, що свідчать про можливість ефективного розпізнавання нештатних ситуацій у високовольтних електричних мережах та можливість розрізнити виникнення перехідних процесів (наприклад, при зміні станів системи в моменти ввімкнення/вимкнення) від короткого замикання.

4.4 Метод інтегрального диференціально-різницевого розпізнавання дискретизованих гармонічних сигналів промислової частоти

Розглянемо моделі накиду та коротких замикань в ЛЕП (рис. 31).

Характерними ознаками накиду є:

- 1) незмінність якісних характеристик гармонічного сигналу при $t < t_0$ та $t \geq t_0$;
- 2) стрибок струму у будь-який момент фази струму від значення $A_1(t < t_0)$ до значення $A_2(t > t_0)$. (Цей стрибок може в 1-2 рази перевищувати початкове значення A).
- 3) до накиду чи спаду навантаження амплітуди струмів є постійними, тобто
 - накид $A_1 = const$; $A_2 = const$; $A_1 \ll A_2$;
 - спад $A_1 = const$; $A_2 = const$; $A_1 \gg A_2$.

Задача розпізнавання такого збурення у ЛЕП може бути успішно вирішена цифровим

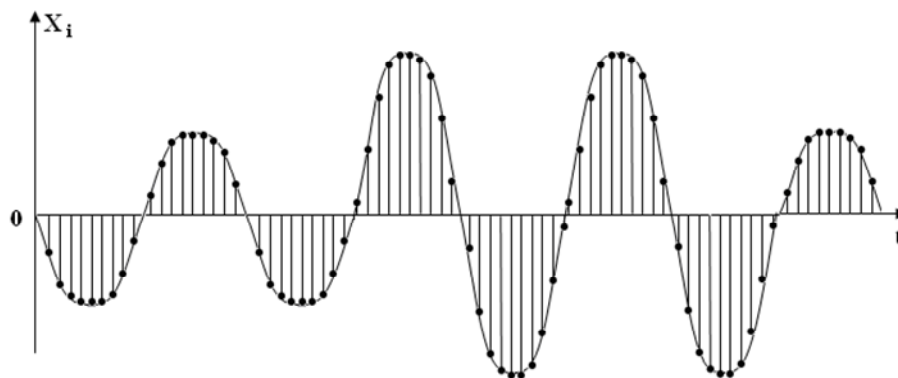


Рисунок 32 – Модель накиду з врахуванням дискретизації за амплітудою гармонічного сигналу при $\Delta t = const$, $\delta = const$

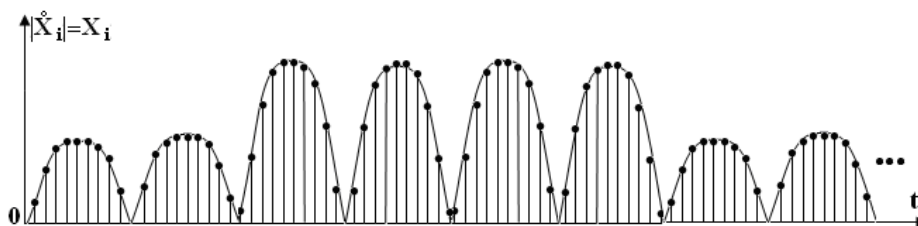


Рисунок 33 – Модульна характеристика моделі накиду гармонічного сигналу

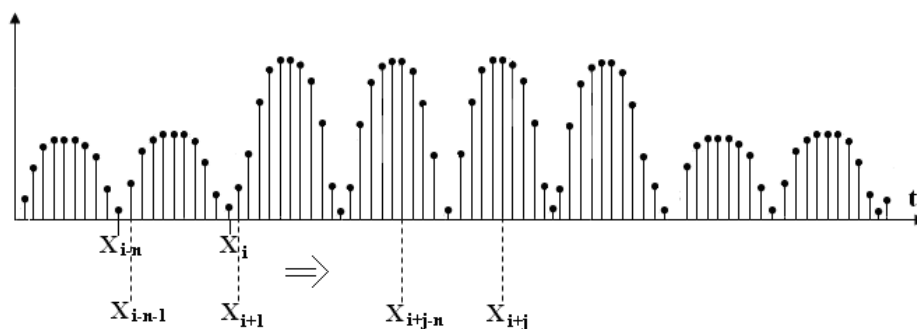


Рисунок 34 – Модель формування різниць текучих та запам'ятованих значень гармонічного сигналу

опрацюванням гармонічних сигналів $X_i = A_i \cos \omega_0 t$ згідно наступного алгоритму (рис. 32).

У результаті на виході АЦП на інтервали одного періоду гармонічного сигналу отримуємо потік цифрових центрованих відліків

$(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, \dots, \dot{x}_n)$, де $M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i = 0$;

$-A \leq x_i \leq A$.

З метою спрощення рішення задачі подамо \dot{x} у вигляді $|\dot{x}|$, тобто це можна зробити на виході АЦП шляхом відкидання знаку або до входу АЦП шляхом випрямлення гармонічного сигналу $|\dot{x}|$ (рис. 33) [5, 7, 9, 11, 12, 16].

Алгоритм опрацювання даних такої моделі виконується з кроком $\Delta t = \frac{\pi}{2}$, тобто у ковзному режимі через напівперіод гармонічного сигналу.

Для виконання різницевого імпульсно-квадратичного методу необхідно рекурентно (у стековому режимі) запам'ятовувати цифрові

відліки x_i у регістрі пам'яті $x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n}$ і різницево порівнювати ці запам'ятовані значення з поточними відліками x_i . Тобто згідно з схемою $\rightarrow x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n} \Rightarrow x_i - x_{i-n}$.

Це означає, що операція віднімання буде виконуватися над даними гармонічного сигналу у моменти, зміщені на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 34).

Як результат виконання такої операції у ковзному режимі з кроком Δt отримаємо:

$$Z_i = |x_i - x_{i-n}|,$$

де модульна операція враховує симетрію зміни амплітуд струмів у напрямі зростання – при накиді та спадання – при скиді навантаження в електромережі.

Графік зміни Z_i в часі при накиді показаний на рис. 35.

З рисунка 37 видно, що реакція процесора буде мати зміну амплітуди струму у момент стрибка: $A_1 \rightarrow A_2$; $A_1 \ll A_2$ на інтервалі напів-

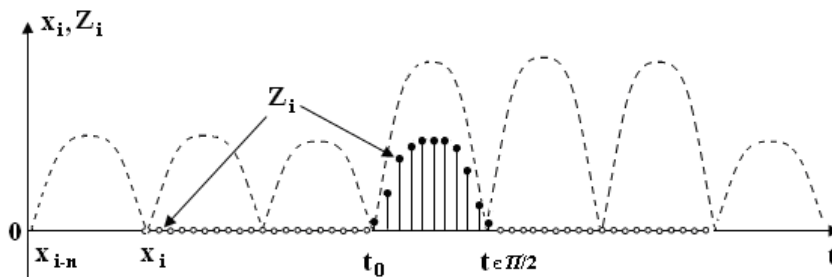


Рисунок 35 – Характеристика розпізнавання та ідентифікації накиду навантаження в електромережі

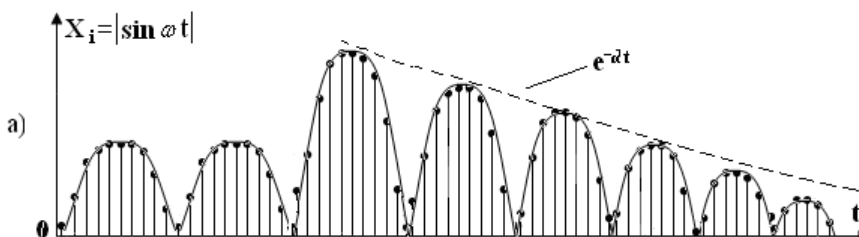


Рисунок 36 – Дискретні моделі коротких замикань в електромережах з експоненціальним спадом струму (а) та одночасним спотворенням гармонічного сигналу (б)

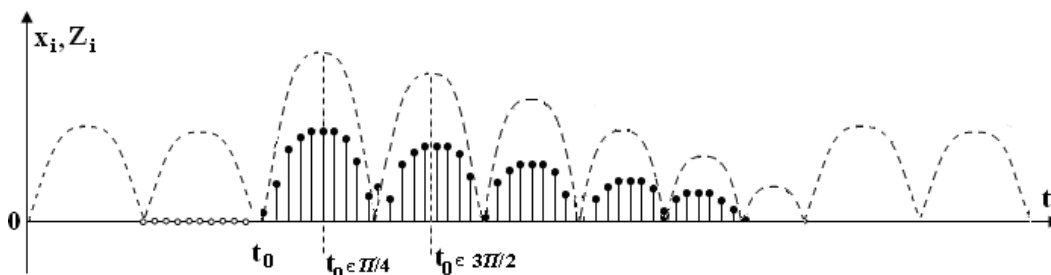


Рисунок 37 – Характеристика розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережах без спотворення гармонічного сигналу

періоду, але є інваріантна до можливих інших більших чи менших стрибків амплітуди струму у інші моменти часу, тобто

$$Z_i = \begin{cases} 0, t \leq t_0; \\ (A_2 - A_1) \sin \omega t, t_0 \leq t \leq t + \pi/2; \\ 0, t > t_0 + \pi/2. \end{cases}$$

Розглянемо задачу розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережі.

Експериментальні дослідження та реєстрація збурень в електромережах за допомогою пристроїв "Альтра" та їх модифікацій показують, що при виникненні коротких замикань різної природи спостерігається наближення до експоненціального затухання або спотворення форми гармонічного сигналу на кількох періодах синусоїди струму на інтервалі часу $t > t_0$. У цьому випадку дискретна модель короткого замикання має вигляд, зображений на рис. 36.

При виникненні такого роду збурення в електромережах у результаті різницево-імпульсного опрацювання гармонічних сигналів в околі часу t_0 отримаємо графік, що зображений на рисунку 7 (модель рис. 36(а)).

Таким чином, на основі запропонованого модульно-різницевого методу факт виникнення збурення в електромережі буде зареєстрований на інтервалі часу $t_0 + \pi/2$ або навіть на інтервалі $t_0 + \pi/4$.

На рис. 38 видно, що при виникненні короткого замикання згідно з розробленим методом, його можна ідентифікувати на інтервалі часу $t_0 + \pi/4 < t_0 + \pi/2 < t_0 + \pi$. Тобто на інтервалі чверті або півперіоду після реєстрації збурення в електромережі.

З метою підвищення чутливості та дозволяючої здатності ідентифікації факту короткого замикання на початковій стадії його розвитку, а також спрощення алгоритму обчислень та структури спецпроцесора, на інтервалі часу $t > t_0 + \pi/2$ доцільно застосувати квадратично-імпульсний метод цифрового опрацювання даних Z_i за виразом:

$$S_{к.з.} = \begin{cases} 1, Z_i^2(t > t_0 + \frac{\pi}{2}) > P_0; \\ 0, Z_i^2(t > t_0 + \frac{\pi}{2}) < P_0, \end{cases}$$

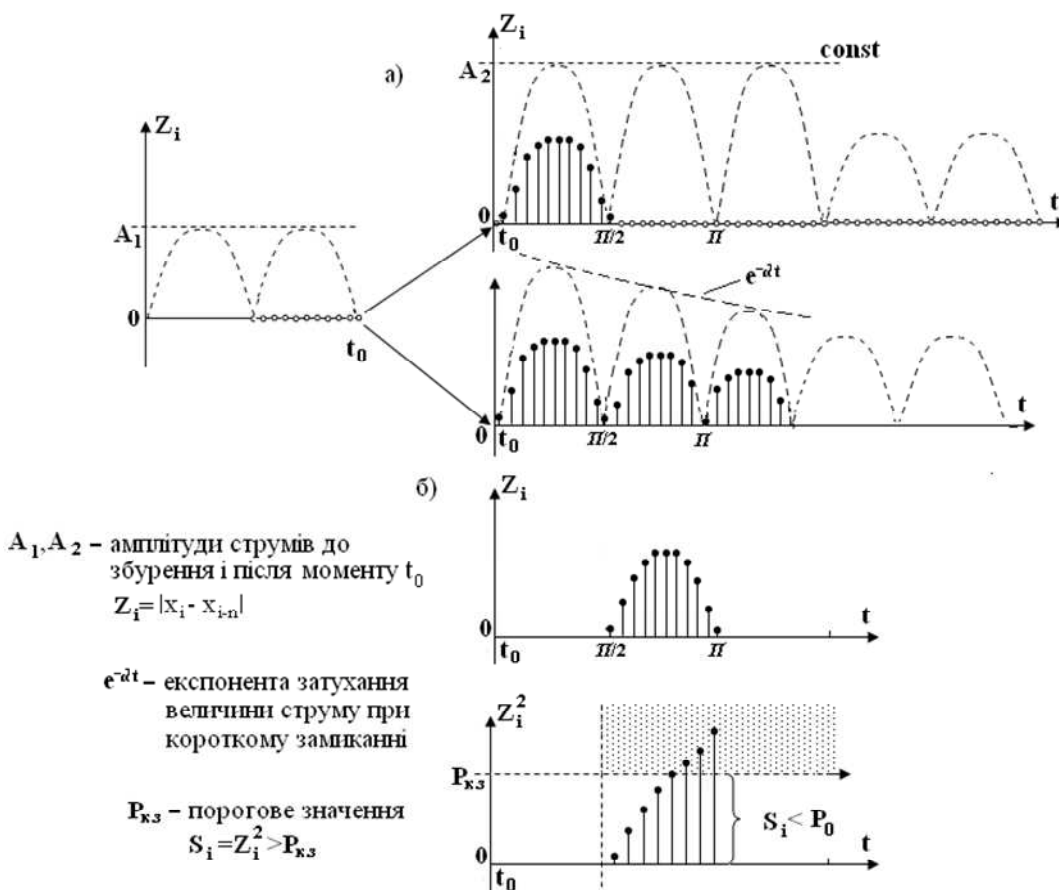


Рисунок 38 – Часова продукційна модель виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду та короткого замикання

де P_0 - порогове значення, яке вибирається експертним шляхом або після багаторазових випробувань на реальних прикладах. Даний поріг P_0 є інваріантним до величини стрибка струму $A_2 \gg A_1 = var$, тобто не залежить від можливої різниці $\Delta = |A_2 - A_1|$ у момент виникнення збурення t_0 . Оскільки у випадку накиду коефіцієнт експоненти $\alpha \approx 0$ і на інтервалі часу $t_0 > t_0 + \frac{\pi}{2}$ $Z_i \approx 0$.

У той же час очевидно, що процеси розвитку коротких замикань можуть мати більш складний характер. У процесі пробоїв ізоляції у високовольтних кабелях можуть спостерігатися кілька наростаючих стрибків чи випадкових амплітудних стрибків струму. У цьому випадку може з'явитися необхідність у більш потужному опрацюванні серій ідентифікованих коротких замикань, що є предметом більш глибоких теоретичних, експериментальних та промислових досліджень на основі теорії Марківських моделей ідентифікації станів квазістаціонарних об'єктів управління та джерел інформації.

4.5 Реалізація алгоритму захисту ліній електропередач номінальною напругою 6-35 кВ за теорією розпізнавання сигналів

Алгоритм розпізнавання сигналів промислової частоти енергосистем методом інтегрального диференціально-різницевого розпізнаван-

ня та ідентифікації збурень та накидів у високовольтних електромережах будується на основі теорії алгоритмів, проблемно орієнтованих до систем реального часу. На рис. 39 показано структуру алгоритму розпізнавання досліджуваних спотворень гармонічних сигналів [16].

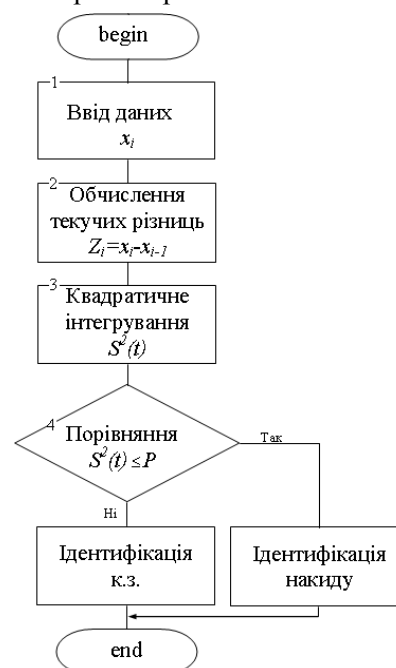


Рисунок 39 – Алгоритм розпізнавання спотворень гармонічних сигналів

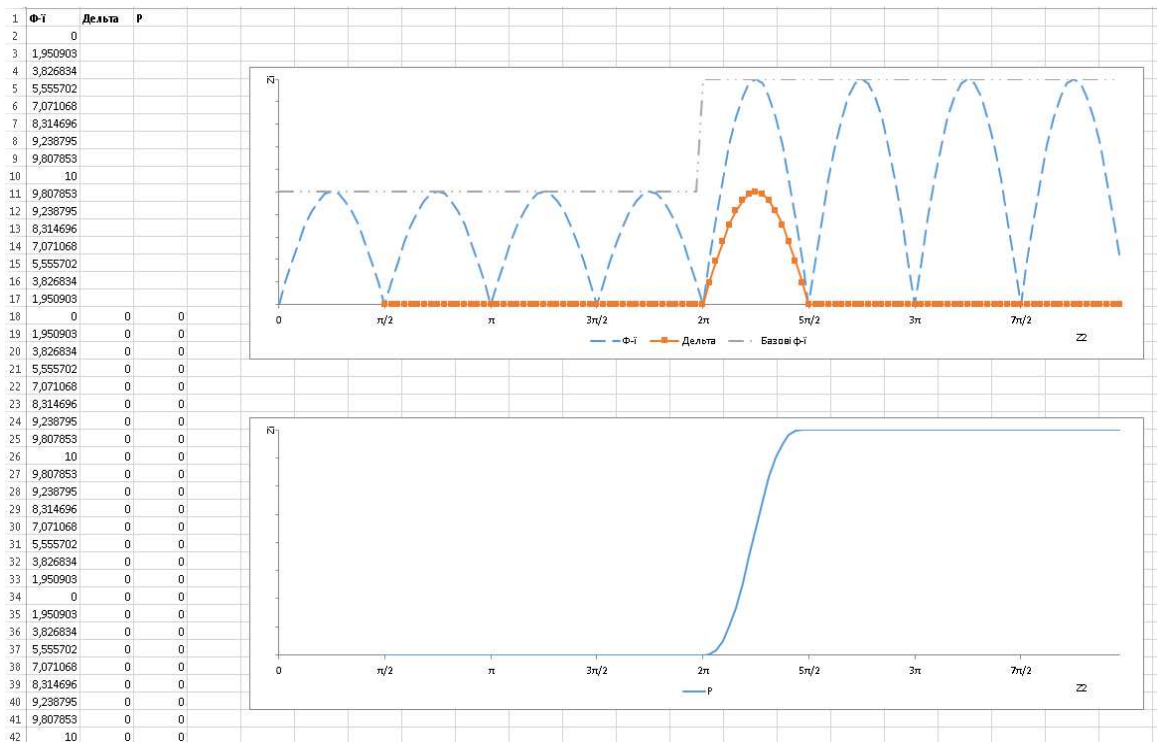


Рисунок 40 – Тестова модель накиду

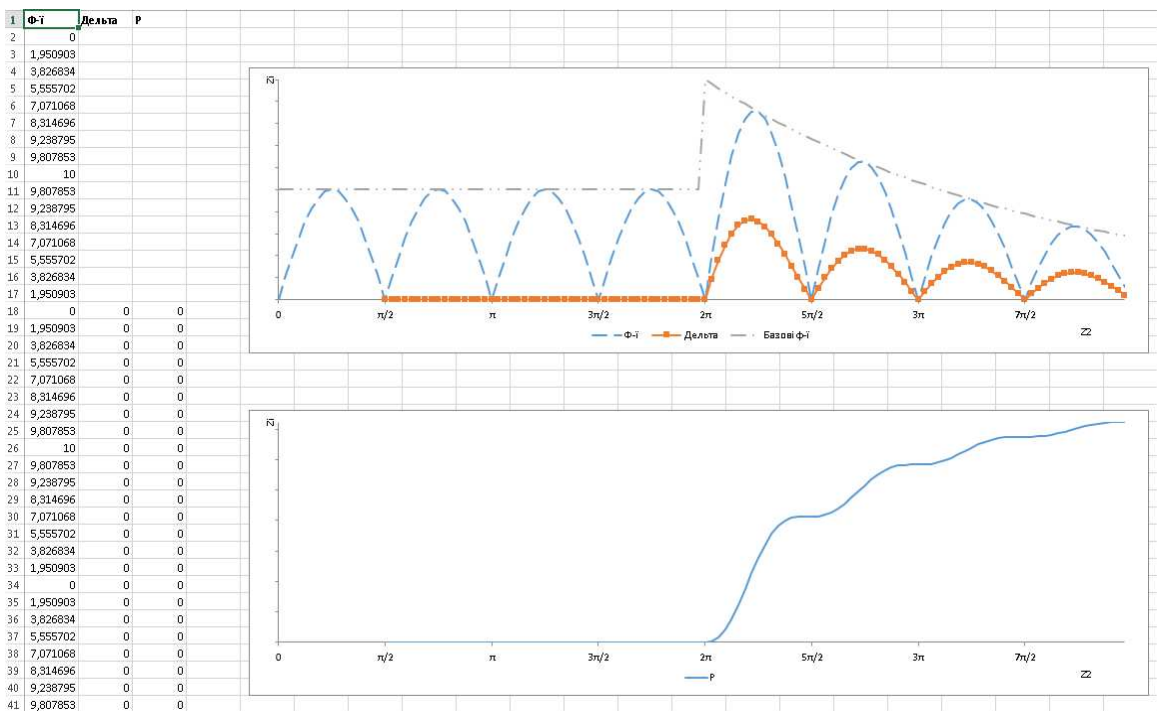


Рисунок 41 – Тестова модель короткого замикання

Програма реалізує алгоритм розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.

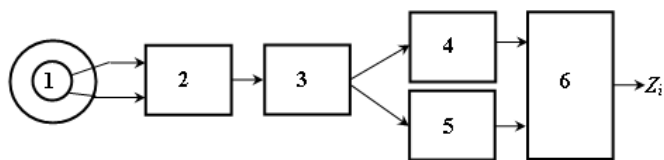
Суть алгоритму полягає у розрахунку різниць між значеннями струмів до збурення і після збурення в лінії електропередач.

У програмі розраховуються два показники:

- Δ – різниця між поточним і зміщеним на напівперіод назад значенням струму;
- P – порогова функція, яка ідентифікує накид або коротке замикання.

Вхідними даними є: список функцій та їх кількість $\pi/2$ періодів, число точок розбиття кожного з $\pi/2$ періодів, коефіцієнт масштабування точок функції.

Вихідні дані: розраховані точки Δ , розраховані точки P , розраховані точки кожної з функцій для кожної точки її розбиття з урахуванням коефіцієнта масштабування. Результати розрахунків для тестових даних (рис. 40 (накид), 41 (коротке замикання)).



- 1 – трансформатор струму; 2 – діодний випрямляч; 3 – аналого-цифровий перетворювач; 4 – фільтр огинаючої низьких частот; 5 – фільтр огинаючої високих частот; 6 – спецпроцесор

Рисунок 42 – Структура пристрою розпізнавання перехідних процесів при успішному та неуспішному запуску ПЕД

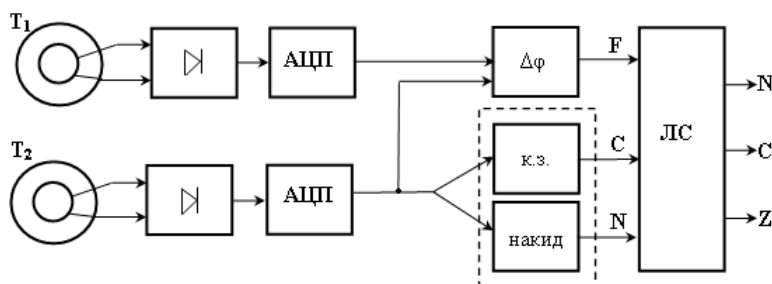


Рисунок 43 – Структурна схема пристрою ідентифікації накидів, замикань на землю та запусків потужних електроприводів у ЛЕП

5 Структура та компоненти мікроелектронного пристрою

На рис. 42 показано запропоновану структуру пристрою розпізнавання перехідних процесів методом розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції, який реалізує метод розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції [14, 16].

Розробка алгоритму ідентифікації запусків ПЕД інваріантних до окремо виникаючих накидів, коротких замикань.

Алгоритм інваріантного розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків ПЕД реалізується на основі методу сумісного використання трансформаторів струму та напруги.

Під час запуску ПЕД виникає значне споживання реактивної потужності, що супроводжується зсувом фаз між напругою та струмом. Дану ознаку можна використати разом з розробленою системою ідентифікації коротких замикань та накидів для ефективного інваріантного розпізнавання окремо виникаючих перехідних процесів ЛЕП, які ідентифікуються як накиди, к.з. та запуски ПЕД.

Теоретичною основою даного методу є інтегральні та диференціально-різницеві алгоритми, які забезпечують розпізнавання накиду та к.з. на основі діаграм та врахування виникнення різниці фаз при запуску ПЕД.

На рис. 43 показана структурна схема пристрою, який оснащений трансформаторами напруги (T_1) та струму (T_2), двоівперіодними випрямлячами, аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), ідентифікатором різниці фаз, пристроєм ідентифікації накидів та к.з. і логічною схемою (ЛС), три виходи якої відповідають: N – накид, C – к.з., Z – запуск ПЕД.

Удосконалений спецпроцесор, який реалізує функції інтегруючого квадратора, складається з першого входу (1), який з'єднаний з першим входом n -розрядного двійкового лічильника-регістра (2), першим входом модуля стартової синхронізації (7) та першим входом регістра пам'яті (4). N -виходів лічильника (2) з'єднанні з відповідними, починаючи з другого молодшого розряду, першими n -входами $(n+k)$ -розрядного комбінаційного суматора (3), перший молодший вхід якого з'єднаний з входом логічної "1" (5), виходи комбінаційного суматора з'єднанні з відповідними другими входами регістра пам'яті (4), прямі виходи D-тригерів якого з'єднанні з відповідними третіми входами комбінаційного суматора та першими входами модуля формування вихідних керуючих сигналів (10), другий вхід якого з'єднаний з пороговою уставкою (11), а виходи (12, 13, 14) є відповідно сигнальні виходи ідентифікації накиду, замикання на землю та запуску потужних електродвигунів.

Другий вхід модуля стартової синхронізації (7) з'єднаний з другим входом синхронізації пристрою (6) та другим входом скиду в нульовий стан лічильника (2). Третій вхід модуля (7) з'єднаний з третім входом числа циклів накопичень k (8), четвертий вхід з'єднаний з входом порогового значення старту P_0 (9), а вихід з'єднаний з четвертим входом регістра скиду в "нуль" регістра пам'яті (4).

Пристрій містить (рис. 44):

- 1 – перший інформаційний вхід;
- 2 – n -розрядний двійковий лічильник-регістр;
- 3 – комбінаційний двійковий суматор;
- 4 – регістр пам'яті на D-тригерах;
- 5 – вхід логічної "1";
- 6 – другий вхід синхронізації пристрою;

- 7 – модуль стартової синхронізації;
- 8 – вхід числа циклів накопичень k ;
- 9 – вхід порогового значення старту P_0 .
- 10 – модуль порівняння з пороговою уставкою 11 та формування вихідних керуючих сигналів;
- 12, 13, 14 – відповідно сигнальні виходи ідентифікації накиду, замикання на землю та запуску ПЕД.

Схема удосконаленого інтегруючого квадратора представлена на рис. 44.

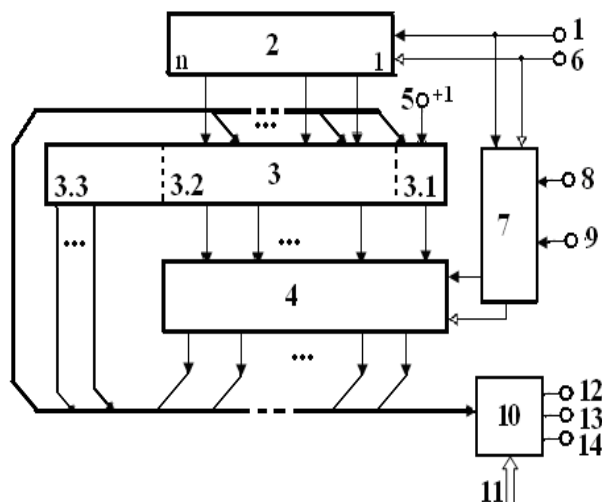


Рисунок 44 – Скоригована структурна схема спеціального процесора обчислення порогової суми квадратів модульних різниць G_i^2

Пристрій працює наступним чином:

1. На вхід 6 надходять сигнали синхронізації роботи пристрою з інтервалом дискретизації АЦП Δt . При цьому лічильник 2 і лічильник у модулі 7 скидаються у нульовий стан. Після k циклів роботи пристрою, регістр пам'яті 4 скидається у нульовий стан.

2. У наступних циклах, після надходження сигналів синхронізації Δt на вхід 6 цикл роботи пристрою повторюється, і в регістрі пам'яті 4 накопичується сума квадратів модульних різниць.

3. На вхід 1 з елемента "Виключаюче АБО" пристрою релейного захисту надходить пачка імпульсів модульної різниці між фазними струмами Δx .

4. Одночасно у лічильнику 2 накопичується код модульної різниці Δx , який зі зсувом на один старший розряд подається на перші входи суматора 3 у вигляді коду $2\Delta x$ плюс одиниця в молодшому розряді суматора. Таким чином, на перші входи суматора надходить код непарного числа $2\Delta x + 1$. Після закінчення до вмісту регістра пам'яті 4 додається квадрат модульної різниці Δx^2 .

5. Після закінчення кількості циклів накопичення k регістр пам'яті 4 скидається в нульовий стан з виходу модуля 7.

6. У процесі роботи пристрою коди, які формуються в регістрі пам'яті 4, порівнюються з кодами уставок 11 у модулі порівняння 10, на

виході якого формуються сигнали управління силовими вимикачами режимів накиду, к.з., запуску ПЕД.

7. Модуль стартової синхронізації 7 призначений для активізації роботи пристрою (в режимі очікування) за відсутності збурень в ЛЕП та активізації роботи в момент виникнення збурень та перехідних процесів.

Висновки

Проведений аналіз типових архітектур високовольтних електромереж: чотирипровідних напругою 380 В; мереж із з'єднанням навантажень в зірку з нульовим проводом; змішаних мереж трифазових, однофазових; радіальних мереж; замкнених мереж з одностороннім живленням; ліній з двостороннім живленням; замкнених мереж із кількома джерелами живлення.

Показано, що в нафтогазовій промисловості найбільшого поширення набули електричні мережі з магістрально ієрархічною структурою. Проведено аналіз збурень у високовольтних ЛЕП при зміні режимів роботи та перехідних процесів та виникнення збурень типу накидів коротких замикань та запусків потужних електродвигунів. Наведено результати досліджень різних збурень у ЛЕП зареєстрованих керувано-діагностичною мікропроцесорною системою «Альтра». Викладено теоретичні засади запропонованих методів розпізнавання спотворень гармонічних сигналів та обґрунтовано доцільність застосування інтегрально-різницевого методу для розробки та реалізації пристроїв релейного захисту високовольтних ліній електропередач. Розроблені алгоритм цифрового опрацювання сигналів, структурна схема пристрою релейного захисту та мікроелектронна реалізація базового компонента інтегруючого квадратора.

Таким чином, актуальним в подальшому буде удосконалення методів та спеціалізованих процесорів розпізнавання збурень у високовольтних електромережах напругою 6 – 10 кВ, які дозволять ідентифікувати не тільки короткі замикання та накиди, але також дозволять визначати пробої та місця їх виникнення у високовольтних кабельних лініях, які приєднані до підстанцій.

Література

- 1 Релейний захист електроенергетичних систем: навч. посібник / В.П.Кідиба. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 504с.
- 2 Люра О.П. Структура алгоритму розпізнавання накидів та КЗ у високовольтних промислових електромережах / Люра О.П., Николайчук Я.М., Возна Н.Я. // Міжнародна наукова координаційна нарада. – Тернопіль, 2014. – С.216-222.
- 3 Zavediuk T. Methods of recognition and identification of disturbances in high-voltage power lines / T. Zavediuk, Y. Franko, O. Liura, I Ostrovka // Матеріали XIII Міжнародної нау-

ково-технічної конференції. – Львів, 2015. – С.282-286.

4 Бахор З. М. Перенапруги в кабельних мережах 10 кВ / З. М. Бахор, О. Двурняк, О. М. Равлик, І. О. Сабадаш // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2001.

5 Возна Н.Я. Метод структурного розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП / Возна Н.Я., Люра О.П. // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції. Івано-Франківськ. – 2015. – С.180-181.

6 Oleh Liura, Ivan Ostrovka, Iryna Sabadash, Yaroslav Nykolaichuk. Theoretical Principles and Methods of Distortions Recognition in Load Surges, Short Circuits and Powerful Electric Drives Launching Type Power Lines: TCSET'2016. – Рр. 33-36.

7 Люра О.П. Методи, перетворювачі та обчислювальні засоби захисту високовольтних ЛЕП від накидів та замикань на землю / Люра О.П. // Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. – Надвірна-Яремче. – 2016. – С.146-150.

8 Oleh Liura, Igor Sabadash, Nataliia Vozna, Ivan Ostrovka. Project of Structural Solutions and Components of Special Processor of Relay Protection in High-Voltage Lines of Electricity Transmission // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). Proceedings. – Рр. 70-73.

9 Люра О. П. Метод розпізнавання накидів на основі цифрового опрацювання сигналів при запуску потужних електроприводів / Люра О.П. // Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. Тернопіль. – 2017. – С.71-73.

10 Люра О.П. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропересялень / Люра О.П., Возна Н.Я. // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів. – 2017. – С.148-155.

11 Сабадаш І.О. Алгоритм опрацювання даних та компоненти спецпроцесора релейного захисту високовольтних ліній електропересялень / Сабадаш І.О., Люра О.П. // Математичне та комп'ютерне моделювання. Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка. – 2017. – С.209-215.

12 Возна Н.Я. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів і замикань на землю у високовольтних лініях електропересялень / Возна Н.Я., Люра О.П., Сабадаш І.О., Островка І.І. // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів. – 2018. – С.79-85.

13 Люра О.П. Пристрої релейного захисту та компоненти спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції / Люра О.П., Возна Н.Я. // Проблемно-наукова міжгалузева конференція. – Надвірна. – 2018. – С.130-135.

14 Пат.103938 Україна МПК H02H 9/00 (2015.01) Пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач / Николайчук Я.М., Возна Н.Я., Люра О.П., Островка І.І.,

Сабадаш І.І. №u201505713; заявл.09.06.2015; опубл.12.01.2016, Бюл. №1/2016.

15 Соломчак О.В. Електропостачання підприємств нафтогазової промисловості: підручник / Соломчак О.В. – Івано-Франківськ. Факел, 2008. – 433 с.

16 Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби: монографія / Возна Н.Я. – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
13.11.18*

*Рекомендована до друку
професором Горбійчуком М.І.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Березьким О.М.
(Тернопільський національний економічний
університет, м. Тернопіль)*