

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ІВАНА ПУЛЮЯ

ЛЮРА ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ

УДК 004.62:656.072

**МЕТОДИ ТА СПЕЦПРОЦЕСОРИ РОЗПІЗНАВАННЯ НАКИДІВ ТА
КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Николайчук Ярослав Миколайович,
Тернопільський національний економічний університет,
завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Дрозд Олександр Валентинович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри комп'ютерних
інтелектуальних систем та мереж;

кандидат технічних наук, доцент
Білан Степан Миколайович
Державний університет інфраструктури та технологій,
доцент кафедри телекомунікаційних технологій та автоматики.

Захист відбудеться “11” березня 2020 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.06 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий “___” лютого 2020 року.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради



Н.В. Загородна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення надійності електрообладнання високовольтних ліній електропередач (ЛЕП) 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. У процесі експлуатації високовольтних ЛЕП можуть виникати особливі перехідні режими та можливість виникнення пошкоджень обладнання електричних та трансформаторних підстанцій. Такі пошкодження приводять до механічного виведення з ладу технологічного обладнання струмами короткого замикання або дугою, яка виникає у місці пошкодження. Висока швидкодія перехідних режимів у ЛЕП на протязі кількох періодів частоти 50 Гц потребує адекватної швидкодії перетворювачів, пристроїв автоматики релейного захисту та спеціалізованих обчислювальних засобів – контролерів, які опрацьовують режими електропостачання у реальному часі. Тому актуальною є наукова задача розробки нових ефективних методів та технічних засобів захисту промислового обладнання ЛЕП від перевантажень та коротких замикань.

Відомі зарубіжні фірми: ABB, Siemens, Alstom, General Electric, Schneider, Areva, Nari, Vamp, Релсіс та інші серійно випускають та масово впроваджують мікроконтролерні засоби релейного захисту ЛЕП. В Україні виробниками мікроконтролерних засобів релейного захисту є: Київприлад, Радіус Автоматика, ІМСКОЕ та ін.. Фундаментальні дослідження по вирішенню даного класу задач провели відомі зарубіжні вчені: Э.М. Шнеерсон, В.Г. Гловацкий, И.В. Пономарев, В.А. Андреев. Важливий внесок у вирішення задач розробки теорії та засобів релейного захисту високовольтних ЛЕП зроблений українськими науковцями: В.С. Костишин, А.Д. Голота, О.М. Равлик, В.П. Кідиба, І.І. Сабадаш, М. С. Сегеда. Теоретичні засади та методи побудови спецпроцесорів цифрового опрацювання сигналів фундаментально викладені відомими науковцями: О.В. Палагіним, А.О. Мельником, В.П. Тарасенком, Я.М. Николайчуком, Г.Ф. Кривулею, Р.Б. Дунцем, А.В. Дроздом, В.А. Головком.

Значний внесок у розвиток теорії розпізнавання образів та побудови високопродуктивних спецпроцесорів цифрового опрацювання даних здійснений науковою школою професора Я.М. Николайчука.

Актуальною науковою задачею є вдосконалення методів розпізнавання накидів, коротких замикань та розробка і вдосконалення алгоритмів та процесорів на основі інтегрально-різницевого підходу.

Незважаючи на широкий спектр спеціалізованих процесорів релейного захисту опрацювання сигналів та цифрових даних, які випускаються фірмами ABB, Siemens, Alstom, General Electric, Schneider, Vamp, Релсіс, вони характеризуються надлишковою універсальністю, що не дозволяє максимально спростити їх структуру та підвищити швидкодію в умовах цільової проблемної орієнтації для задач релейного захисту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертаційній роботі дослідження виконані згідно плану кафедри комп'ютерних систем та мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти

і газу та кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету за темами:

- науково-дослідної роботи «Розробка теоретичних засад та алгоритмів ідентифікації запусків потужних електроприводів у високовольтних ЛЕП на основі теорії розпізнавання образів» (державний реєстраційний номер 0115U002340), у якій автором проведено дослідження спотворень при коротких замиканнях у високовольтних лініях електропередач та спотворень гармонічних сигналів при виникненні накидів;

- науково-дослідної роботи «Розробка структурної схеми та компонентів дослідного взірця пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань на землю у високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006790), у якій автором проведено аналіз характеристик відомих пристроїв захисту обладнання високовольтних ЛЕП від накидів та коротких замикань та розробка схемотехнічних рішень компонентів пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань (РНКЗ), спецпроцесор інтегруючий квадратор;

- науково-дослідної роботи «Розробка теорії, методології та алгоритмів структуризації образно-кластерних моделей моніторингу станів електричних підстанцій високовольтних ЛЕП» (державний реєстраційний номер 0116U006792), у якій автором виконано аналіз типів електромереж, які пересилають електроенергію на електричних підстанціях (ПС).

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у вдосконаленні методів розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах та розробці високопродуктивних спецпроцесорів ідентифікації накидів та коротких замикань. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити принципи, теоретичні основи та методи розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах та провести аналіз досвіду розробки проблемно-орієнтованих універсальних та спеціалізованих спецпроцесорів.

2. Дослідити характеристики перехідних процесів при виникненні збурень у високовольтних електромережах.

3. Дослідити методи розпізнавання спотворень гармонічних сигналів на основі рандомізації та кореляційного нейропроцесорного опрацювання сигналів.

4. Розробити дискретну модель накиду формування різниць поточних та запам'ятованих значень гармонічного сигналу при виникненні накиду в електромережі.

5. Розробити дискретні моделі коротких замикань в електромережах із експоненціальним спадом струму без спотворення та з спотворенням гармонічного сигналу.

6. Розробити принципи та спецпроцесори розпізнавання накидів та коротких замикань на основі інтегрально-квадратично-різницевого розпізнавання гармонічних сигналів.

7. Розробити принципові схемо-технічні рішення компонентів пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач та удосконалити їх характеристики.

8. Провести лабораторні випробування компонентів пристрою релейного захисту.

9. Реалізувати у мікроелектронному виконанні на ПЛІС компоненти структури ПРЗ.6-10.

Об'єкт дослідження – процеси розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.

Предмет дослідження – методи та засоби опрацювання оцифрованих сигналів високопродуктивними спецпроцесорами розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.

Методи дослідження базуються на використанні теорії інформації для формування цифрових даних розпізнавання образів, теорії чисел для формування оцінок Хеммінгової віддалі між образами, теорії синтезу та аналізу компонентів та процесорів обчислювальних засобів, комп'ютерної логіки та теорії цифрового опрацювання даних. Розробка технічних засобів здійснюється з використанням методів схемо-системотехніки, мікроелектронного та імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблений метод розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах шляхом оцифрування та рандомізації амплітудних значень фазних струмів, зсунутих на півперіода промислової частоти 50 Гц, який відрізняється від відомих методів інваріантністю до змін амплітуд фазних струмів при виникненні збурень у високовольтних електромережах та дозволяє ідентифікувати накид та коротке замикання.

2. Вперше розроблений метод кореляційного опрацювання унітарних кодів фазних струмів із затримкою в часі, шляхом визначення інтегрального квадрату модульної різниці між унітарними кодами, що дозволило, у порівнянні із відомими методами, спростити формування кодів модульних різниць між цифровими значеннями фазних струмів виконанням логічної операції «Виключаюче-АБО», відповідно підвищити швидкодію кореляційного аналізу та спростити мікроелектронну реалізацію такого компоненту пристрою релейного захисту.

3. Удосконалено метод визначення квадрату модульних різниць шляхом додавання непарних двійкових чисел, кількість яких відповідає значенню унітарного коду модульної різниці між фазними струмами, що в порівнянні з відомими методами, які реалізуються згідно арифметики кодів базису Радемахера, дозволяє підвищити швидкодію та спростити алгоритми обчислень інтегралу модульних різниць.

4. Отримав подальший розвиток метод розпізнавання збурень гармонічних сигналів на основі процесів рандомізації шляхом розширення бази кодової послідовності М-сигналу від значення $n=7$ до $n=15$, що дозволило у порівнянні з відомим методом збільшити у два рази амплітуду кореляційного піку та відповідно підвищити ефективність розпізнавання збурень у високовольтних електромережах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропонований, розроблений та реалізований у мікроелектронному виконанні на ПЛІС компонент пристрою релейного захисту, який здійснює кореляційне визначення модульної різниці між унітарними кодами фазних струмів.

2. Розроблена та реалізована в мікроелектронному виконанні структурна схема інтегруючого квадратора, який, у порівнянні з відомими схемотехнічними рішеннями у базисі Радемахера, характеризується в 1,5 рази підвищеною швидкодією та зменшеною у 2-3 рази апаратною складністю шляхом виконання обчислень паралельно з формуванням унітарних кодів модульних різниць.

3. Розроблені схемотехнічні мікроелектронні компоненти дослідного взірця пристрою релейного захисту, випробувані в лабораторних умовах, за результатами яких скоректовані технічні рішення для супроводження їх дослідної партії.

Теоретичні та практичні результати роботи використано та впроваджено:

- в науково-дослідних роботах кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету;

- в Інституті мікропроцесорних систем керування об'єктами електроенергетики, що дозволило підвищити швидкодію розпізнавання перехідних процесів мікропроцесорною керувально-діагностувальною системою «Альтра», яка встановлюється на підстанціях підприємства «Закарпатобленерго»;

- в ПП «Енерготех НГ» для контролю та управління роботою двигунів, що дозволило підвищити надійність роботи насосних станцій водопостачання та водовідведення (м. Калуш);

- на кафедрі комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисципліни «Спеціалізовані комп'ютерні системи та мережі»;

- на електрично-механічному відділенні державного вищого навчального закладу Калуського політехнічного коледжу при викладанні дисципліни «Основи проектування та конструювання електроустановок».

Особистий внесок здобувача.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1, 3, 8] – досліджені системні характеристики компонентів пристрою релейного захисту; [2] – запропонований метод розпізнавання коротких замикань у високовольтних ЛЕП; [3] – розроблена структура багаторозрядного регістра зсуву та оптимізована реалізація логічного елемента «Виключаюче АБО» цифрового корелятора пристрою релейного захисту; [3, 16] – досліджені перехідні характеристики збурень у високовольтних ЛЕП; [4] – розроблена структура та функціональна схема спецпроцесора розпізнавання збурень у високовольтних ЛЕП; [5] – оптимізована та скорегована структурна схема спецпроцесора обчислення порогової суми квадратів модульних різниць; [6, 12, 8] – розроблена структура алгоритму розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних промислових електромережах; [7] – запропонований метод ідентифікації збурень у високовольтних електромережах; [8, 18] – сформульовані та викладені теоретичні засади методів розпізнавання збурень у високовольтних електромережах на основі нейрокомпонентів, рандомізації та інтегрально-різницевого опрацювання сигналів; [3, 8, 9] – систематизовані засоби релейного захисту високовольтних ліній електропересялень; [10] – розроблені компоненти визначення модульних різниць спецпроцесорів розпізнавання образів у Хеммінговому просторі; [11] – досліджений алгоритм розпізнавання накидів та коротких замикань у промислових електромережах; [12] – розроблено алгоритм розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП; [15] – розроблений компонент

спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції; [17] – розроблений метод розпізнавання збурень спецпроцесором на основі нейрокомпонента; [18] – розроблена модель формування різниць поточних та запам'ятовуваних значень гармонічних сигналів та дискретні моделі коротких замикань в електромережах з експоненціальним спадом струму та одночасним спотворенням гармонічного сигналу; [4, 19] – розроблена структура інтегрально-різницевого квадратора пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на IV-ій Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ-2014)» (Тернопіль, 2014); міжнародній науково-координаційній нараді «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (Тернопіль, 2014); XIII-ій міжнародній науково-технічній конференції «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці (CADSM 2015)» (Львів, 2015); II-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ, 2015); міжнародній науковій конференції «13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2016)» (Львів, 2016); проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПІС-2016)» (Надвірна-Яремче, 2016); міжнародній науковій конференції «XIIIth International Conference. Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)», (Закарпаття, 2017); Всеукраїнській конференції з міжнародною участю «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ)» (Тернопіль, 2017); проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПІС – 2018)» (Надвірна, 2018); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту» (Івано-Франківськ, 2018); 15th International Conference. The Experience of Designing and Application of CAD System (CADSM' 2019).

Публікації.

За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, у тому числі: 5 статей у провідних фахових виданнях, 2 наукові праці індексовані в науково-метричних базах Web of Science та Scopus, 1 патент України на корисну модель, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, співавтор 2 монографій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 201 сторінку, у тому числі 150 сторінок основного тексту, рисунків 101 та 9 таблиць, список використаної літератури налічує 120 бібліографічних найменувань. Дисертація містить 9 додатків, розміщених на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету,

основні завдання, об'єкт та предмет досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок автора та його публікації.

У першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз архітектур та характеристик промислових типів високовольтних електромереж, що дозволило обґрунтувати актуальність розробки та впровадження ефективних методів розпізнавання та діагностування накидів та коротких замикань у приєднаннях електричних підстанцій.

Досліджені особливості топологій електромереж підприємств та електропостачання технологічних установок нафтогазовидобувної промисловості, які оснащені потужними електроприводами і характеризуються високим ступенем пожежо-, екологічної небезпечності. Встановлено, що найбільш складні задачі релейного захисту потребують ефективного вирішення у розподілених електромережах 6-10 кВ видобування нафти глибинними установками верстатів-гойдалок (рис. 1).

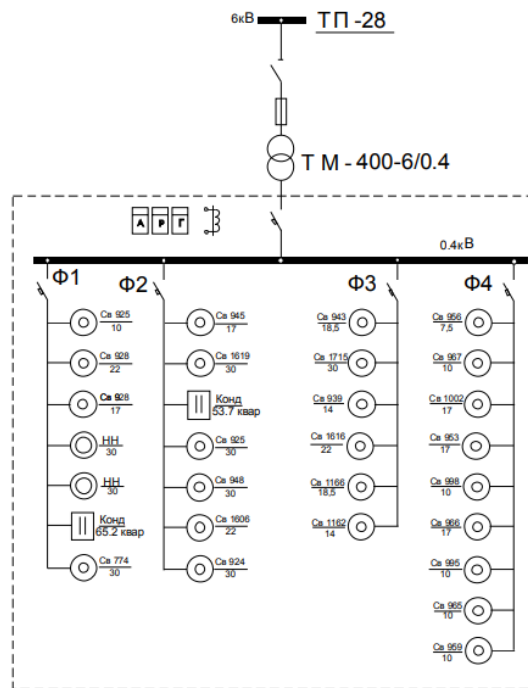


Рисунок 1 – Структура електропостачання нафтовидобувного промислу

Досліджені та систематизовані інформаційні характеристики існуючих комп'ютеризованих систем моніторингу режимних параметрів та станів обладнання високовольтних електромереж, в яких застосовуються електромеханічні та мікропроцесорні пристрої релейного захисту. Класифіковані переваги та недоліки та функціональні обмеження існуючих систем.

Проведений аналіз характеристик відомих пристроїв та спецпроцесорів захисту обладнання високовольтних ЛЕП від накидів та коротких замикань. Встановлено, що відомі засоби характеризуються надлишковою універсальністю, високою апаратною складністю та вартістю, що обмежує їх масове застосування на електричних підстанціях з великою кількістю приєднань. В результаті обґрунтована

доцільність розробки та широкомаштабного впровадження удосконалених мікроелектронних спецпроцесорних засобів релейного захисту на основі алгоритмів цифрового опрацювання гармонічних сигналів промислової частоти при виникненні збурень у високовольтних електромережах.

Обґрунтовані перспективні методи цифрового опрацювання сигналів та ідентифікації збурень у високовольтних електромережах типу накидів та коротких замикань на основі теорії розпізнавання образів. Виконана постановка завдань досліджень.

У другому розділі на основі цифrogram, зареєстрованих керувально-діагностичною системою «Альтра», досліджені характеристики перехідних процесів у високовольтних електромережах при виникненні збурень типу накидів. Зміна амплітудних характеристик струму та напруги у високовольтних лініях електропередач типу накидів виникають при комутації режимів роботи енергосистем (рис. 2).

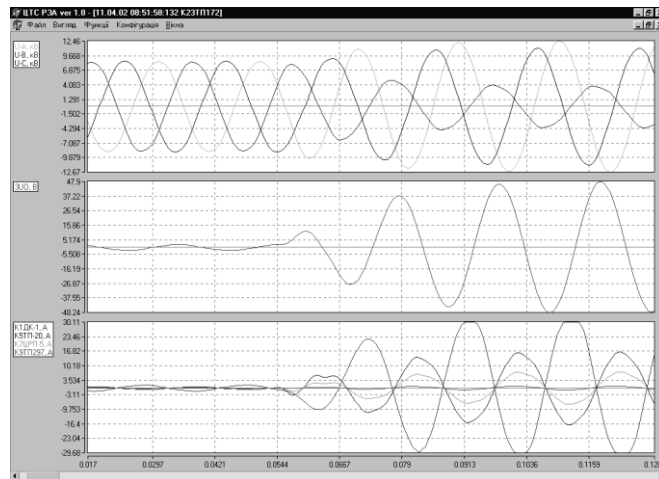


Рисунок 2 – Графіки координат фазових напруг, напруг в нейтралі і струмів при комутації режимів роботи енергосистем

На основі проведених досліджень побудована ідентифікаційна модель зміни амплітуди фазного струму без спотворень при виникненні накиду та його завершення, яка показана на рис. 3.

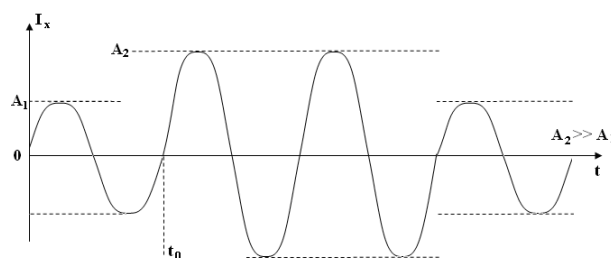


Рисунок 3 – Модель накиду струму при включенні у момент t_0 потужного споживача:

A_1 – амплітуди фазних струмів до накиду і після його завершення, A_2 – амплітуда фазного струму при виникненні накиду, t_0 – момент виникнення накиду

На основі отриманої моделі з метою реалізації цифрових методів опрацювання фазних струмів розроблені двохполярна та однополярні моделі накиду у вигляді решітчастої функції цифрових відліків дискретизованих у часі та амплітуді фазних струмів.

Вперше запропонована та досліджені характеристики дискретної моделі формування різниць поточних та запам'ятовуваних значень гармонічного сигналу при виникненні накиду та короткого замикання в електромережі.

У результаті на виході АЦП на інтервалі одного періоду гармонічного сигналу отримаємо потік цифрових центрованих відліків $(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, \dots, \dot{x}_n)$, де

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i = 0; \quad -A \leq x_i \leq A.$$

У роботі автором запропонована модульна характеристика дискретної моделі накиду гармонічного сигналу, яка представлена на рис. 4.

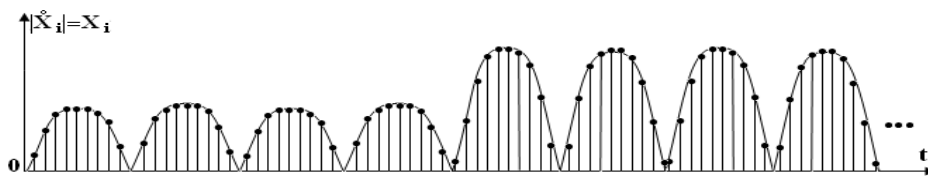


Рисунок 4 – Модульна характеристика моделі накиду гармонічного сигналу

У ковзному режимі з кроком Δt отримаємо:

$$Z_i = |x_i - x_{i-n}|, \quad (1)$$

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

Графік зміни Z_i в часі при накиді показаний на рис. 5.

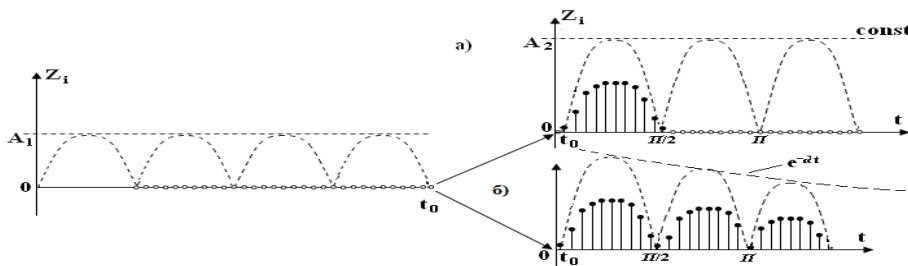


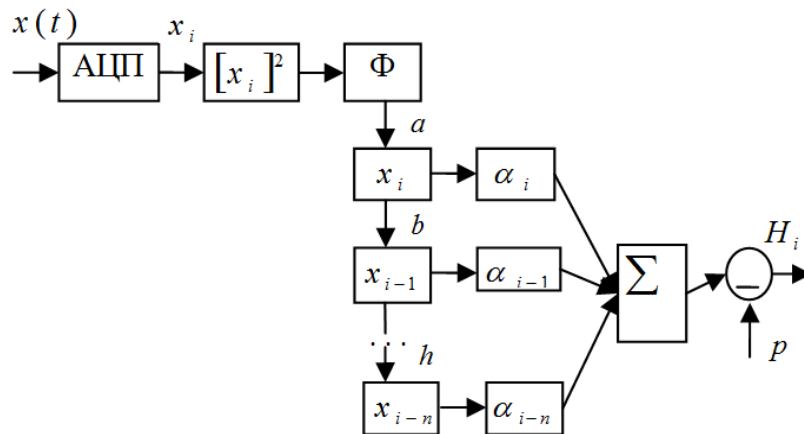
Рисунок 5 – Модель розпізнавання та ідентифікації накиду та короткого замикання в електромережі

Вперше розроблена та досліджені характеристики дискретної однополярної моделі при виникненні однофазних замикань у високовольтних електромережах з експоненціальним спадом струму без спотворення та з спотвореннями гармонічного сигналу. Здійснений розрахунок оцінки об'єму даних для побудованих дискретних моделей згідно інформаційної міри ентропії Р.Хартлі.

Виконано обґрунтування вибору структури кореляційного визначення Хеммінгової віддалі між цифровими сигналами згідно оцінки відстані Чебишева,

шляхом порівняння функціональних структур та мікроелектронних компонентів в унітарному теоретико-числовому базисі (ТЧБ) та базисі Радемахера. Показано, що реалізація мікроелектронного компонента кореляційного опрацювання сигналів у базисі Радемахера характеризується складним алгоритмом обчислень, але, в порівнянні з кодуванням даних в унітарному базисі, має менший об'єм регістрової пам'яті, що визначає доцільність застосування кодів унітарного базису у кореляційному компоненті пристрою релейного захисту.

У третьому розділі досліджений метод розпізнавання перехідних процесів в енергетичних системах на основі процесора з нейрокомпонентами квадратично-імпульсного перетворення гармонічних сигналів (рис. 6).



$$H_i = \begin{cases} 1, Z_i \geq p \\ 0, Z_i < p \end{cases}, \quad Z_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot x_i$$

Рисунок 6 – Структура кореляційного нейропроцесора для розпізнавання гармонічних сигналів на основі моделі рекурентного нейрона:
 Z_i - функція реакції нейрона на вхідний сигнал x_i ; α_i - ваговий коефіцієнт; p – порогове значення; H_i - вихідний сигнал.

Проаналізовані результати програмного моделювання розпізнавання накиду та короткого замикання на основі цифрового опрацювання двополярних та однополярних моделей накидів та коротких замикань. Розраховані характеристики часової та апаратної складності структури кореляційного нейропроцесора для розпізнавання гармонічних сигналів на основі моделі рекурентного нейрона. В результаті встановлено, що процесори такого класу мають складні алгоритми обчислень та велику апаратну складність. Тому недостатньо ефективно можуть бути застосовані у якості мікроелектронних компонентів промислових пристроїв релейного захисту.

Удосконалений метод рандомізації та кореляційної оцінки збурень у високовольтних електромережах, який, у порівнянні з відомим методом, характеризується підвищеною у два рази роздільною здатністю за рахунок застосування кодів М-послідовностей зі збільшеною базою $n = 15$.

Згідно оператора рандомізації $\mathcal{R}ap$ послідовності $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$

здійснюється дія, яка полягає в переміщенні i -го елемента на місце j -го елемента послідовності X , а відповідність між i та j визначає закон рандомізації:

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

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

Рандомізація виконується над кожним елементом послідовності X . Для того, щоб показати, що i -й елемент послідовності X переміщено на місце $\mathfrak{Ran}(x_i)$, використаємо наступну форму запису:

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

В результаті рандомізації послідовності X утворюється послідовність $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$, причому $x_i = y_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$. У більшості випадків рандомізації $n = m$, тобто рандомізована послідовність має ту саму довжину, що і початкова. Проте, при зсуві фази сигналу на основі рандомізації, відбувається розширення розміру рандомізованої послідовності, тобто $m = n + r$, де r - величина зсуву.

Існує очевидна процедура \mathfrak{Ran}^{-1} , обернена до \mathfrak{Ran} , тобто така, що дозволяє отримати початкову послідовність з рандомізованої, тобто:

$$\mathfrak{Ran}^{-1}(Y) = X.$$

Якщо пряма процедура \mathfrak{Ran} виконується згідно виразу $y_i = x_{s_i}$, тоді процедура \mathfrak{Ran}^{-1} виконується так:

$$\mathfrak{Ran}^{-1}: \quad z_{s_i} = y_i.$$

де $S = \{s_i\}$ - масив-ключ (закон) рандомізації. Очевидно, що $z_i = x_i$, тому процедура рандомізації є зворотною.

При сигнальній рандомізації виконується переміщення дискретизованих значень синусоїди x_i з метою отримання форми огинаючої, максимально близької до М-послідовності. На рис. 7 показані графіки амплітуд центральних та бокових пелюстків автокореляційних функцій М-сигналів з базою $n = 15$.

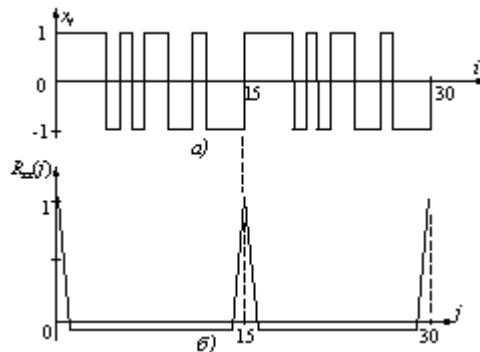


Рисунок 7 – Графік амплітуд центральних та бокових пелюстків автокореляційної функції М-сигналу

У результаті такого гармонічного сигналу з врахуванням відповідних вагових

коефіцієнтів отримаємо рандомізований гармонічний сигнал, який представлений на рис. 8.

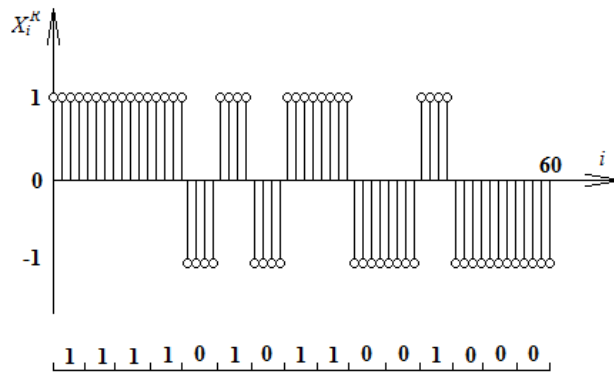


Рисунок 8 – Графік рандомізованого гармонічного сигналу $n = 15$ з чотирикратним розширенням рандомізованого коду

Досліджені алгоритми та схемотехнічні рішення спецпроцесорів реалізації операцій піднесення до квадрату цифрових кодів, представлених в унітарному теоретико-числовому базисі. Розроблений алгоритм піднесення до квадрату унітарних кодів шляхом обчислення непарних чисел. Розроблений алгоритм спецпроцесора інтегруючого квадратора та обчислені характеристики його апаратної та часової складності. Розроблений спецпроцесор відрізняється від відомих меншою алгоритмічністю та апаратною складністю, тому застосований в якості мікроелектронного компонента пристрою релейного захисту.

На основі досліджених методів та спецпроцесорів розпізнавання збурень типу накидів у високовольтних електромережах, а також обґрунтованих структур мікроелектронних компонентів кореляційного опрацювання гармонічних сигналів розроблена функціональна структура пристрою релейного захисту рис. 9.

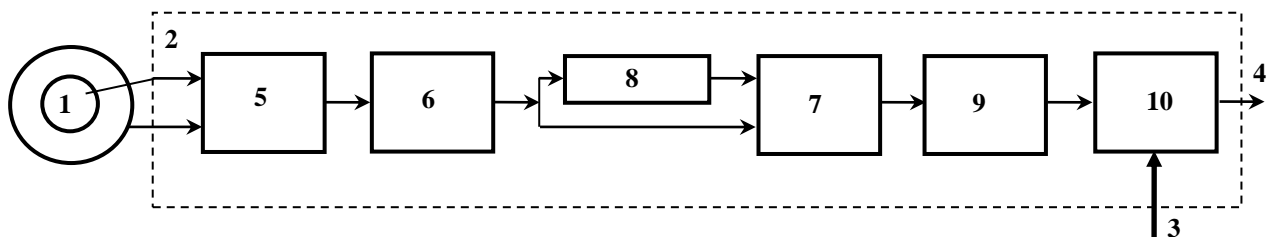


Рисунок 9 – Функціональна схема пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач:

1 – трансформатор струму; 2 – модуль опрацювання сигналів; 3 – вхідна шина уставки; 4 – вихідна шина управління силовим вимикачем; 5 – випрямляч струму; 6 – АЦП; 7 – логічний елемент «виключаюче АБО»; 8 – регістр зсуву; 9 – інтегруючий квадратор; 10 – елемент порівняння.

В четвертому розділі виконано розробку та реалізацію спецпроцесорів розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних ЛЕП. Здійснено обґрунтування вибору електронних компонентів пристрою релейного захисту: трансформатора струму та двохпівперіодного випрямляча, які задовільняють

вимогам їх застосування у високовольтних електромережах 6-10кВ.

Досліджені структури та характеристики відомих АЦП та здійснено обґрунтування застосування у якості компонента пристрою релейного захисту АЦП розгортуючого типу (рис. 10), який характеризується низькою апаратною складністю та забезпечує формування вихідних кодів в унітарному ТЧБ, що дозволило спростити реалізацію автокореляційного компонента визначення модульної різниці поточного та затриманого в часі на півперіода промислової частоти цифрового значення фазного струму.

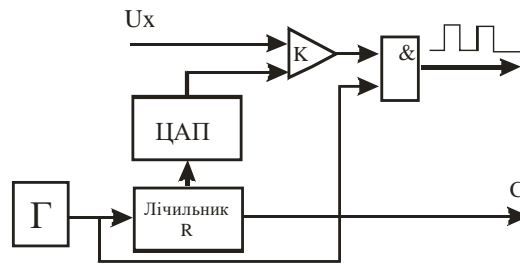


Рисунок 10 – Структура АЦП розгортуючого типу в унітарному базисі

Удосконалена схемотехнічна реалізація БРЗ шляхом перетворення унітарних кодів у коди базису Радемахера на його вході та відновлення його унітарних кодів на його виході, що, у порівнянні з БРЗ на основі унітарних кодів, дозволило зменшити його апаратну складність у 26 разів рис. 11.

Вхідна цифрова інформація на виході АЦП може представлятися у вигляді паралельного двійкового коду, або біт орієнтованого коду:

$$x_i \begin{cases} a_{k-1} \\ \dots \\ a_j \\ \dots \\ a_0 \end{cases} ; \text{ або } \overbrace{a_0 \dots a_j \dots a_{k-1}}^{x_i} ; x_i = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \cdot 2^j ,$$

де $a_j \in \overline{0,1}$, x_i - поточне значення цифрового відліку, яке поступає на вхід кореляційного спецпроцесора.

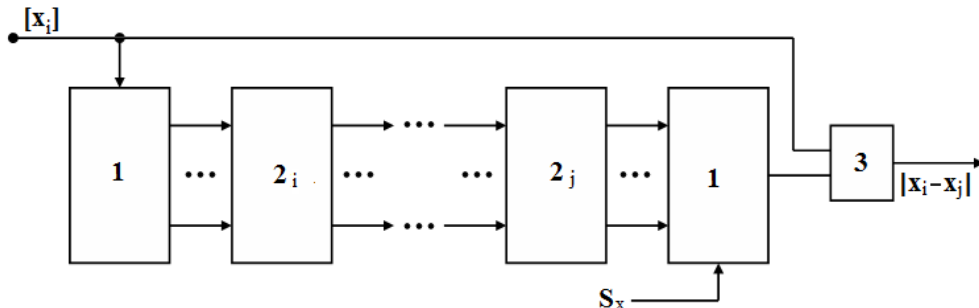


Рисунок 11 – Структурна схема удосконаленого багаторозрядного регістра зсуву

Структурна схема удосконаленого багаторозрядного регістра зсуву містить:
 $[x_i]$ – вхідний унітарний код;
 1 – сумуючий двійковий лічильник;

2 – регістри пам'яті на D-тригерах;

1 – віднімаючий двійковий лічильник;

3 – логічний елемент «Виключаюче АБО»;

S_x – імпульси синхронізації зчитування вихідного унітарного коду $[x_j]$.

Розроблена структура спецпроцесора, який обчислює імпульсно-квадратичну функцію S_i , (рис.12).

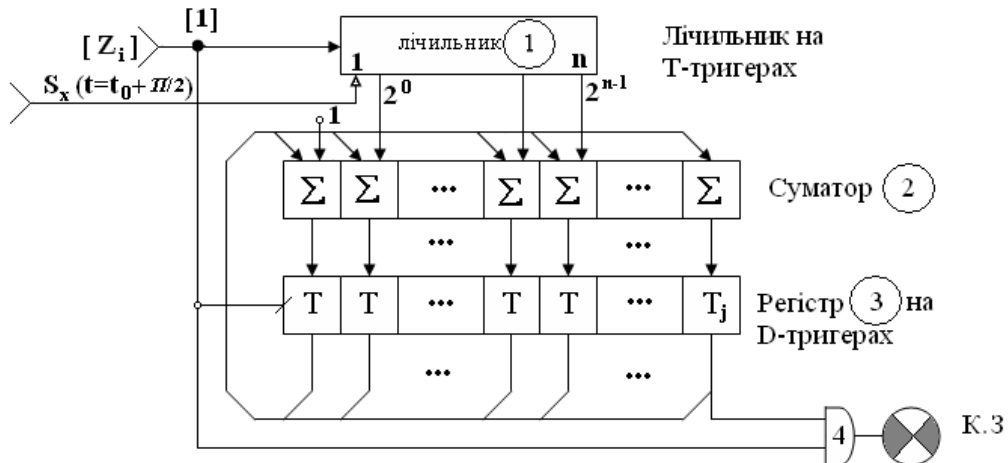


Рисунок 12 – Структура спецпроцесора обчислення порогового значення імпульсно-квадратичної функції $S_i > P_0$.

Робота спецпроцесора виконується згідно алгоритму:

1. У момент часу $t = t_0 + \pi/2$ формується сигнал скиду лічильника 1 у нульовий стан, одночасно "0" записується у регістр – 3.
2. Після кожного імпульсу-1 на вході лічильника $[Z_i]$ до його вмісту додається одиниця, а за рахунок зміщення його виходів на один розряд вправо плюс "1" у молодшому розряді в суматор додаються коди непарних чисел.
3. У результаті, в накоплюючому регістрі формується код наростаючої імпульсно-квадратичної суми S_i .
4. Як тільки на виході T_j -го тригера накопичувального регістра з'явиться сигнал "1" ($2^j = P_0$) на виході логічного елемента 4 формується також сигнал "1", що свідчить про перевищення значення функції $S_i > P_0$ та ідентифікації розвитку короткого замикання у високовольтній електромережі.

Реалізація такого спецпроцесора може бути легко реалізована на одному кристалі ПЛІС або на спеціальній платформі конкретної фірми. Швидкодія такого спецпроцесора може бути реалізована на тактовій частоті до 50 МГц, що забезпечує цифрову реєстрацію 1024 10-ти бітних відліків на виході АЦП трансформатора струму.

При цьому апаратна складність спецпроцесора складає: $A=10$ (Т-тригерів)+ 20 (Σ -суматорів)+ 20 (Д-тригерів) або, враховуючи, що один Т-тригер містить 4 вентиля, суматор - 5 вентилів, Д-тригер – 2 вентиля отримаємо сумарне число вентилів на ПЛІС $10 \cdot 4 + 20 \cdot 5 + 20 \cdot 2 = 180 \approx 200 \cup$, де \cup - символ вентиля "І-НЕ" на ПЛІС.

Виконаний розрахунок апаратної та часової складності мікроелектронних компонентів розробленого пристрою релейного захисту та його порівняння з аналогічними характеристиками відомих пристроїв на основі нейропроцесорів та процесорів рандомізації. У результаті чого отримана оцінка зменшення апаратної складності запропонованого пристрою у порівнянні з відомими у 20 разів та підвищена швидкодія пристрою у 10-30 разів.

Розроблена програма та здійснені лабораторні випробування компонентів дослідного взірця пристрою релейного захисту, які підтвердили адекватність практичної реалізації розробленого методу та схемотехнічних рішень удосконалених компонентів пристрою.

Здійснено проектування на Plis топології інтегруючого квадратора, у якості мікроелектронного компонента пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки методів та спецпроцесорів релейного захисту високовольтних електромереж шляхом цифрового опрацювання збурень типу коротких замикань та накидів, інваріантних до амплітуди фазних струмів у приєднаннях високовольтних підстанцій.

1. Виконаний аналіз архітектур та характеристик збурень у промислових високовольтних електромережах, досліджені особливості топологій електромереж електропостачання, технологічних установок нафтогазовидобувної промисловості. Встановлено, що найбільш складні задачі релейного захисту потребують ефективного вирішення у розподілених електромережах 6-10 кВ видобування нафти глибинними установками верстатів гойдалок. Досліджені та систематизовані інформаційні характеристики існуючих комп'ютеризованих систем моніторингу режимних параметрів та станів обладнання високовольтних електромереж, в яких застосовуються електромеханічні та мікроконтролерні пристрої релейного захисту. Проаналізовані переваги, недоліки та функціональні обмеження існуючих систем. На основі цифrogram, зареєстрованих керувально-діагностичною системою «Альтра», досліджені характеристики перехідних процесів у високовольтних електромережах при виникненні збурень типу накидів та коротких замикань. В результаті встановлено, що при комутації режимів роботи енергосистем фазні струми можуть зростати у кілька разів. При цьому не спостерігається від'ємна експоненціальна складова, характерна для коротких замикань.

2. Вперше розроблені двополярна та однополярна моделі накиду та короткого замикання у вигляді решітчастих функцій цифрових відліків фазних струмів. Показано, що однополярна модульна дискретна модель накиду дозволяє у 2 рази підвищити швидкодію ідентифікації типу збурення на інтервалі одного періоду промислової частоти. Удосконалено метод рандомізованого опрацювання гармонічних сигналів шляхом застосування розширеної М-последованості, що дозволило у 2 рази підвищити порогове значення центрального пелюстка функції автокореляції та покращити інформативність діагностування збурень у високовольтних електромережах.

3. Вперше запропоновано метод та досліджені характеристики дискретної моделі формування різниці поточних та запам'ятовуваних значень гармонічного

сигналу згідно кореляційної оцінки Хеммінгової віддалі між поточним та затриманим на півперіода фазними сигналами при виникненні накиду та короткого замикання в електромережі. Удосконалена структура багаторозрядного регістра зсуву компонента цифрового корелятора шляхом застосування міжбазисних перетворень унітарного коду та коду базису Радемахера, що дозволило у 15 разів зменшити його апаратну складність без втрати швидкодії. Розроблена структура інтегруючого квадратора пристрою релейного захисту, який дозволяє розпізнавати накиди та короткі замикання у високовольтних електромережах.

4. Розроблені мікроелектронні компоненти пристрою релейного захисту реалізовані на ПЛІС, розраховані характеристики їх апаратної та часової складності, які у порівнянні з відомими, дозволили зменшити у 18 разів апаратну складність та при застосування k -розрядного АЦП для кодування фазних струмів підвищити швидкодію у $2^k/2k$ разів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Люра О.П., Возна Н.Я. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропересялень. *Науковий вісник НЛТЕУ України*, 2017. – №5. - Львів С.148-155.

2. Сабадаш І.О., Люра О.П. Алгоритм опрацювання даних та компоненти спецпроцесора релейного захисту високовольтних ліній електропересялень. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки, випуск 15*. Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2017. – С.209-215.

3. Возна Н.Я., Люра О.П., Сабадаш І.О., Островка І.І. Метод розпізнавання та ідентифікації накидів і замикань на землю у високовольтних лініях електропересялень. *Науковий вісник НЛТЕУ України*, 2018. – №1. - Львів С.79-85.

4. Сидор А.І., Люра О.П., Николайчук Я.М. Теоретичні засади та задачі розпізнавання гармонічних сигналів та образів на основі оцінки Хеммінгової віддалі. *Науковий вісник НЛТЕУ України*, 2018. – №3. - Львів С.131-137.

5. Люра О.П., Возна Н.Я., Николайчук Я.М. Дослідження перехідних процесів у високовольтних лініях електропересялень 6 – 10 кВ та розроблення мікроелектронного спецпроцесора релейного захисту, інваріантного до зміни амплітуд фазних струмів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, 2018. – № 2 (45). – Івано-Франківськ С.57-65.

6. Люра О.П., Николайчук Я.М., Возна Н.Я. Структура алгоритму розпізнавання накидів та КЗ у високовольтних промислових електромережах. Міжнародна наукова координаційна нарада. *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління*. Випуск № 9. Тернопіль. – 2014. – С.216-222.

7. T. Zavediuk, Y. Franko, O. Liura, I. Ostrovka. Methods of recognition and identification of disturbances in high-voltage power lines. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції. *Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці: CADSM 2015*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – С.282-286.

8. 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. *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2016)*. - PP. 33-36.

9. 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. *2017 XIIIth International Conference. Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. Proceedings. – PP. 70-73.

10. Andrij Sydor, Yaroslav Nykolaychuk, Nataliia Vozna, Boris Krulikovskiy, Alina Davletova, Oleh Liura. Methods and processors for image recognition in a linear and quadratic Hamming space. *2019 15th International Conference. The Experience of Designing and Application of CAD System (CADSM' 2019)*. - PP. 9-12.

11. Николайчук Я.М., Люра О.П. Дослідження алгоритму розпізнавання накидів та коротких замикань у промислових електромережах. Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*. ТНЕУ. Тернопіль. – 2014. – С.252-255.

12. Возна Н.Я., Люра О.П. Метод структурного розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП. Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості, інститут інформаційних технологій*. Івано-Франківськ. – 2015. – С.180-181.

13. Люра О.П. Методи, перетворювачі та обчислювальні засоби захисту високовольтних ЛЕП від накидів та замикань на землю. Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. *Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПИС-2016)*. Надвірна-Яремче. – 2016. – С.146-150.

14. Люра О.П. Метод розпізнавання накидів на основі цифрового опрацювання сигналів при запуску потужних електроприводів. Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*, Тернопіль. – 2017. – С.71-73.

15. Люра О.П., Возна Н.Я. Пристрої релейного захисту та компоненти спецпроцесора визначення квадратично-імпульсної функції. Проблемно-наукова міжгалузева конференція. *Юриспруденція та проблеми інформаційного суспільства (ЮПИС – 2018)*. Присвячується 100-річчю заснування Національної академії наук України. Надвірна. – 2018. – С.130-135.

16. Люра О.П. Структура та функції мікроелектронного пристрою моніторингу накидів та замикань на землю у високовольтних лініях електропересилань. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції. *Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту*. Івано-Франківськ. – 2018. – С.181-182.

17. T. Zavediuk, Y. Franko, O. Liura. Recognition of images based on special processors with neural components. *Computer technologies in information security. Edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nykolaichuk*. – Ternopil: «Cart-blansh», 2015. 387p. – С.299-313.

18. Возна Н.Я., Люра О.П., Сабадаш І.О. Теоретичні засади і алгоритми ідентифікації перехідних процесів у високовольтних ЛЕП та розробка пристрою розпізнавання накидів та коротких замикань. *Спеціалізовані комп'ютерні технології*

в інформатиці. За загальною редакцією Я.М. Николайчука. – Тернопіль: 2017. 919с. – С.396-437.

19. № 103938 МПК (2015.01) H02H 9/00. Опублікований 12.01.2016. Бюл. №1. Николайчук Я.М, Возна Н.Я., Люра О.П., Островка І.І., Сабадаш І.І. Пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

АНОТАЦІЯ

Люра О.П. Методи та спецпроцесори розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах. – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти» – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Міністерство освіти і науки України, Тернопіль, 2019.

Дисертацію присвячено розробці методів та спецпроцесорів розпізнавання накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах та підвищенню ефективності їх релейного захисту. Проведено дослідження характеристик ідентифікації збурень у високовольтних електромережах. Досліджені функції та інформаційні характеристики існуючих комп'ютеризованих систем моніторингу режимних параметрів та станів обладнання високовольтних електричних підстанцій.

Вперше розроблені двополярна та однополярна моделі накиду та короткого замикання у вигляді решітчастих функцій цифрових відліків фазних струмів. Показано, що однополярна модульна дискретна модель накиду дозволяє у 2 рази підвищити швидкодію ідентифікації типу збурення на інтервалі одного періоду промислової частоти.

Удосконалено метод рандомізованого опрацювання гармонічних сигналів шляхом застосування розширеної М-послідованості, що дозволило у 2 рази підвищити порогове значення центрального пелюстка функції автокореляції та покращити інформативність діагностування збурень у високовольтних електромережах. Удосконалена структура базаторозрядного регістра зсуву компонента цифрового корелятора шляхом застосування міжбазисних перетворень унітарного коду та коду базису Радемахера, що дозволило у 15 разів зменшити його апаратну складність без втрати швидкодії, вдосконалена структура інтегруючого квадратора пристрою релейного захисту.

Розроблені мікроелектронні компоненти пристрою релейного захисту реалізовані на ПЛІС, які у порівнянні з відомими, дозволили зменшити у 18 разів апаратну складність та, при застосуванні k-розрядного АЦП для кодування фазних струмів, підвищити швидкодію.

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

АННОТАЦІЯ

Люра О.П. Методы и спецпроцессоры распознавания накидов и коротких замыканий в высоковольтных электросетях. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Компьютерные системы и компоненты» - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Министерство

образования и науки Украины, Тернополь, 2019.

Диссертация посвящена разработке методов и спецпроцессоров распознавания накидов и коротких замыканий в электросетях и повышению эффективности их релейной защиты. Проведено исследование характеристик идентификации возмущений в электросетях. Исследованы функции и информационные характеристики существующих компьютеризированных систем мониторинга режимных параметров и состояний оборудования высоковольтных электрических подстанций.

Впервые разработаны двухполярный и однополярные модели накида и короткого замыкания в виде решетчатых функций цифровых отсчетов фазных токов. Показано, что однополярная модульная дискретная модель накида позволяет в 2 раза повысить быстродействие идентификации типа возмущения на интервале одного периода промышленной частоты.

Усовершенствован метод рандомизированной обработки гармонических сигналов путем применения расширенной М-последовательности, что позволило в 2 раза повысить пороговое значение центрального лепестка функции автокорреляции и улучшить информативность диагностики возмущений в электросетях. Усовершенствованна структура многоуровневого регистра сдвига компонента цифрового коррелятора путем применения междубазисных преобразований унитарного кода и кода базиса Радемахера, что позволило в 15 раз уменьшить его аппаратную сложность без потери быстродействия, усовершенствованна структура интегрирующего квадратора устройства релейной защиты.

Разработанные микроэлектронные компоненты устройства релейной защиты реализованы на ПЛИС, по сравнению с известными, позволили уменьшить в 18 раз аппаратную сложность и, при применении k-разрядного АЦП для кодирования фазных токов, повысить быстродействие.

Ключевые слова: высоковольтные электросети, накид, короткое замыкание, спецпроцессор, электродвигатель, переходные процессы.

SUMMARY

Liura O.P. Methods and special processors for detecting load surges and short circuits in high-voltage electrical networks. - on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.05 "Computer systems and components" – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2019.

The dissertation is devoted to the development of methods and special processors for the recognition of charges and short circuits in high voltage electric networks and to increase the efficiency of their relay protection. The research of characteristics of perturbation identification in high voltage electric networks is carried out. The functions and information characteristics of existing computerized monitoring systems of the regime parameters and equipment state of high-voltage electrical substations are investigated.

For the first time, bipolar and unipolar models of overturning and short-circuit in the form of lattice functions of digital counts of phase currents have been developed. It is shown that the unipolar modular discrete model of the projection can increase the speed of

identification of the type of perturbation in the interval of one period of industrial frequency in 2 times.

The method of randomized processing of harmonic signals was improved by the use of an expanded M-sequence, which allowed to increase the threshold value of the central lobe autocorrelation function in 2 times and to improve the informativeness of the diagnostics of perturbations in high-voltage power grids. An improved structure of the base-digit shift register of the component of the digital correlator through the application of inter-baseline transformations of the unitary code and the code of the basis of Rademacher, which allowed to reduce its hardware complexity by 15 times without loss of speed, and the structure of the integrating quadrant of the relay protection device is improved.

The developed microelectronic components of the relay protection devices are implemented on the FPGA, which, in comparison with the known ones, allowed to reduce the hardware complexity by 18 times and, with the use of a k-bit ADC for phase currents, increase the speed.

Keywords: high-voltage electrical networks, load surges, short circuit, special processor, electric motors, transitional processes.

Підписано до друку 27.01.2020 р. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк різнографічний. Гарнітура Times New Roman. Авт. арк. 0,9. Наклад 100.

Видавець та виготівник «Симфонія форте»

76019, м. Івано-Франківськ, вул. Крайківського, 2, тел. (0342) 77-98-92

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців
та виготівників видавничої продукції: серія ДК № 3312 від 12.11. 2008 р.