



О. П. Люра¹, Н. Я. Возна²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

²Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАНЬ

Розроблено швидкодіючі алгоритми (максимум 1-2 періоди промислової частоти) виявлення та інваріантної ідентифікації перехідних процесів у лініях електропересилань (ЛЕП) типу накидів, коротких замикань та запуску потужних електроприводів (ПЕД), на основі яких визначено функції пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропересилань. Подано структуру малогабаритного, мікроелектронного швидкодіючого пристрою релейного захисту з розширеними функціональними можливостями розпізнавання накидів та захисту високовольтних ЛЕП від коротких замикань, здійснено синтаксис його функцій. Це дало змогу 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 електропересилань. Систематизовано наявні засоби релейного захисту на основі апаратних та програмно-апаратних мікропроцесорних контролерів цифрового захисту. Класифіковано компоненти спецпроцесора та обґрунтовано їх характеристики, орієнтовані на лінії електропересилань 6 кВ. Продемонстровано часові діаграми випрямлених значень фазної напруги, струму та різниці фаз $\Delta\varphi$ при накидах, коротких замиканнях та запуску потужних електродвигунів у високовольтних ЛЕП.

Ключові слова: діагностування; збурення; накид; коротке замикання; електричне обладнання; спецпроцесор; розпізнавання.

Вступ. У процесі експлуатації високовольтних ЛЕП можуть виникати особливі перехідні режими та пошкодження обладнання електричних та трансформаторних підстанцій. Такі пошкодження призводять до механічного виводу з ладу технологічного обладнання струмами короткого замикання або дугою, яка виникає у місці пошкодження.

Окрім цього, небезпечним також є пониження напруги у вузлових точках електроенергетичної системи внаслідок коротких замикань, що впливає на порушення технологічних процесів споживачів електроенергії та стійкості генераторів енергосистеми. Висока швидкодія перехідних режимів у ЛЕП упродовж кількох періодів частоти 50 Гц потребує адекватної швидкодії перетворювачів, пристроїв автоматики релейного захисту (РЗ) та спеціалізованих обчислювальних засобів – контролерів, які опрацьовують режими електропостачання у реальному часі. Тому актуальним завданням є розроблення нових ефективних методів та технічних засобів захисту промислового обладнання ЛЕП від перевантажень та коротких замикань.

У зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки, пристрої релейного захисту, виконані за цифровими принципами, широко використовують в енергосистемах

нашої та іноземних держав.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Істотні переваги, якими володіють цифрові пристрої порівняно із традиційними електромеханічними пристроями релейного захисту, робить їх застосування в енергетичних системах практично безальтернативним (Kidyba, 2015).

Основними перевагами цифрових пристроїв є висока точність відтворення заданих характеристик функціонування пристрою; отримання характеристик будь-якої складності; запам'ятовування координат режиму під час спрацювання цифрового пристрою; можливість зміни конфігурації пристрою; універсальність; малі габарити та менше використання електротехнічних матеріалів; можливість самодіагностики; менше споживання енергії для функціонування.

Традиційні пристрої релейного захисту, особливо електромеханічні, не мають функцій самодіагностики і є багато випадків в експлуатації, коли під час виникнення аварії ці пристрої не спрацювали і після аналізу виявилось, що вони були несправними, про що оперативний персонал і не здогадувався.

Також унаслідок експлуатації цифрових пристроїв РЗ у вітчизняних та закордонних енергосистемах виявились і їхні негативні особливості. До них належать: від-

Інформація про авторів:

Люра Олег Петрович, аспірант. Email: oleg.lura14@gmail.com

Возна Наталія Ярославівна, канд. техн. наук, доцент. Email: nvozna@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Люра О. П., Возна Н. Я. Дослідження та оптимізація характеристик компонентів мікроелектронного пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропересилань. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(5). С. 148–154.

Citation APA: Liura, O. P., & Vozna, N. Ya. (2017). Research and optimization of the components of microelectronic devices of relay in high-voltage lines. Scientific Bulletin of UNFU, 27(5), 148–154. <https://doi.org/10.15421/40270529>

мови процесорів; слабкий захист цифрових пристроїв РЗ від електромагнітних завад; можливість виведення з ладу хакерами цифрових пристроїв РЗ через загальні інформаційні мережі; відсутність єдиних національних стандартів щодо конструкції цифрових пристроїв РЗ, їх програмного забезпечення методики налагодження та умов експлуатації.

Метою роботи є розроблення теоретичних засад методів та алгоритмів розпізнавання збурень у промислових високовольтних електромережах і також застосування цифрових пристроїв РЗ в енергосистемах для захисту високовольтного обладнання ЛЕП на основі цифрового опрацювання сигналів.

Опис структури пристрою і функцій

Структура пристрою розпізнавання перехідних процесів методом розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємореляції. На рис. 1 показано запропоновану структуру пристрою розпізнавання перехідних процесів під час успішних та неуспішних запусків потужних електроприводів, який реалізує метод розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємореляції.

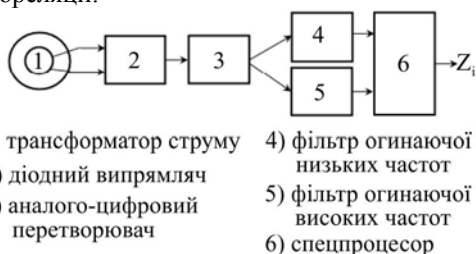


Рис. 1. Структура пристрою розпізнавання перехідних процесів під час успішного та неуспішних запусків ПЕД

Розроблений метод інтегрального диференціально-різницевого розпізнавання дискретизованих гармонічних сигналів та структура пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропересилань, який виконує розпізнавання та ідентифікацію накидів та коротких замикань у ЛЕП, характеризується обмеженими функціональними можливостями, оскільки, як буде показано в наступному розділі, перехідні процеси в ЛЕП під час запуску потужних електроприводів одночасно характеризуються властивостями накиду та коротких замикань. Це не дає змогу успішно застосувати розроблений метод та пристрій для одночасного розпізнавання накидів, коротких замикань та пуску потужних електроприводів.

Тому актуальною теоретичною та прикладною задачею є розроблення теорії, методів та пристроїв релейного захисту, які реалізують можливості одночасного розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків потужних електроприводів.

Розроблення алгоритму ідентифікації запусків потужних електродвигунів (ПЕД) інваріантних до окремо виникаючих накидів та 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. Цю ознаку можна використати сумісно з розробленою системою ідентифікації коротких замикань та накидів для ефективного інваріан-

тного розпізнавання окремо виникаючих перехідних процесів ЛЕП, які ідентифікуються як накиди, КЗ та запуски ПЕД.

Теоретичною основою цього методу є інтегральні та диференціально-різницеві алгоритми, які забезпечують розпізнавання накиду та КЗ на основі діаграм, представлених на рис. 2 та врахування виникнення різниці фаз під час запуску ПЕД.

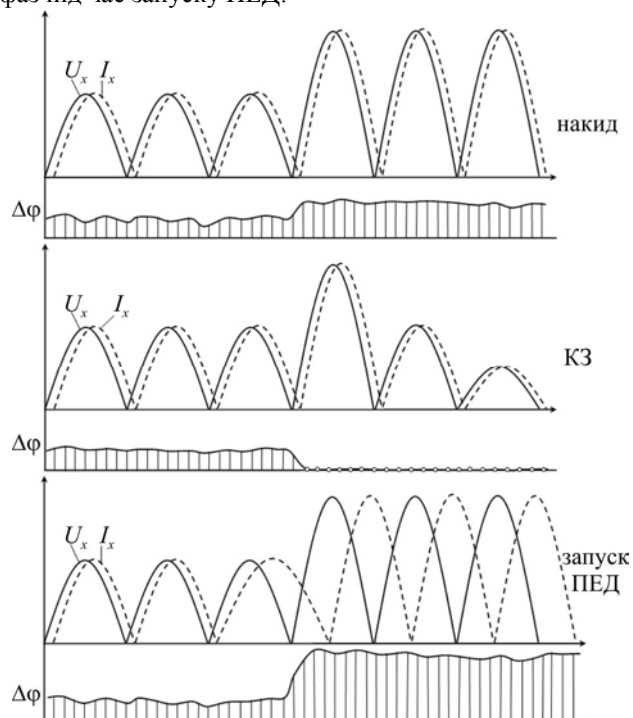


Рис. 2. Часові діаграми випрямлених значень фазної напруги, струму та різниці фаз $\Delta\phi$ під час накидів, КЗ та запуску ПЕД у високовольтних ЛЕП

На рис. 3 показано структурну схему пристрою, який оснащений трансформаторами напруги (Т1) та струму (Т2), двохпівперіодними випрямлячами, аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), ідентифікатором різниці фаз, пристроєм ідентифікації накидів та к.з. і логічною схемою (ЛС), три виходи якої відповідають: N – накид, С – КЗ, Z – запуск ПЕД.

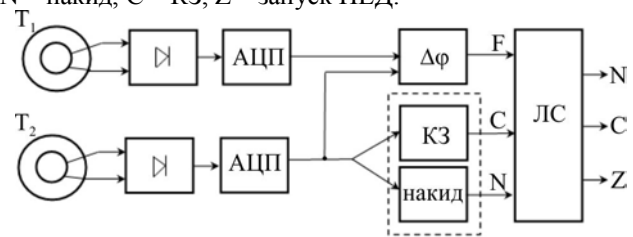


Рис. 3. Структурна схема пристрою ідентифікації накидів, замикань на землю та запусків потужних електроприводів у ЛЕП

У таблиці істинності (табл. 1) показано опрацювання вихідних сигналів пристрою розпізнавання NCZ (див. рис. 2), вихідні сигнали якого описуються логічними рівняннями:

$$N = \bar{F} \wedge \bar{C} \wedge N; \quad C = \bar{F} \wedge C \wedge \bar{N}; \\ Z = F \wedge \bar{C} \wedge N \vee F \wedge C \wedge \bar{N} = F \wedge (\bar{C} \wedge N \vee C \wedge \bar{N}).$$

Табл. 1. Таблиця істинності

F	C	N	N	C	Z
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1

Аналіз досліджених методів ідентифікації розпізнавання окремо виникаючих накидів, коротких замикань та запусків ПЕД показує, що найбільш інформаційним та перспективним для розробки алгоритму опрацювання та спец процесорів, що забезпечують інваріантну ідентифікацію перехідних процесів незалежно від амплітуди фазних струмів, є метод на основі сумісного використання трансформаторів струму і напруги та логічного опрацювання характеристик перехідних процесів при виникненні накидів, к.з. та запусків ПЕД.

Розроблення функціональної структури пристрою ідентифікації накидів та коротких замикань для релейного захисту високовольтних ліній електропередач. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень перехідних процесів у ЛЕП при виникненні накидів та коротких замикань на основі диференціально-різницевого методу запропоновано та розроблено структуру пристрою ідентифікації накидів та коротких замикань для релейного захисту високовольтних ЛЕП, структуру якого показано на рис. 4.

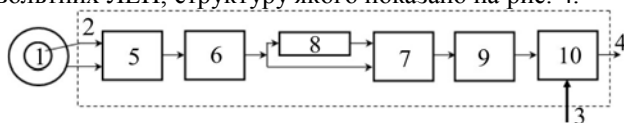


Рис. 4. Схема пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач

Пристрій належить до технічних засобів релейного захисту високовольтних ліній електропередач і може бути використаний для розпізнавання накидів та коротких замикань інваріантних до величини зростання струмів в окремих фазах електролінії.

Відомий аналог: пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач у вигляді реле струму, який містить трансформатор струму, вихід якого підключений до порогового елемента типу електромагнітного реле, виходом якого є керуючі контакти силового вимикача (Kidyba, 2015).

Недоліками такого пристрою є: необхідність багаторазового налаштування порогового рівня спрацювання реле струму в разі зміни конфігурації та режимів роботи обладнання ЛЕП, а також обмежені функціональні можливості, зумовлені тим, що пристрій не дає змогу автоматично розпізнавати накиди та короткі замикання в ЛЕП, коли вхідна амплітуда зростання струму у фазі при коротких замиканнях (наприклад, у віддаленій ділянці ЛЕП) менша від вхідної амплітуди зростання струму при включенні потужного споживача (наприклад, електроприводу чи відключенні паралельної лінії постачання електроенергії потужному електроспоживачеві);

Відомий також пристрій релейного захисту високовольтних ЛЕП, який містить трансформатор струму, вихід якого підключений до порогового елемента типу цифрового мікроконтролера, виходом якого є керуючі контакти силового вимикача (Kidyba, 2015).

Недоліком пристрою є обмежені функціональні можливості, зумовлені тим, що пристрій моделюючи цифровою обробкою функції реле струму не дає змогу автоматично розпізнавати накиди та короткі замикання в ЛЕП, коли вхідні амплітуди зростання струму у фазі є інваріантні, а характер спотворень струму не опрацьовується. Іншим недоліком відомого пристрою є висока складність та вартість універсального багатофункціонального мікропроцесорного контролера для цифрового опрацювання струмів у фазах ЛЕП. Це обмежує

можливості масового застосування таких пристроїв, число яких може складати десятки і сотні на високовольтних підстанціях.

В основу цього пристрою поставлено задачу вдосконалення пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач шляхом додаткового введення випрямляча струму, АЦП, логічного елемента "Виключає АБО", регістра зсуву, що дає змогу отримати можливість розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП незалежно від абсолютних значень зростання струму в одній із фаз.

Запропонований пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач (Nykolaichuk et al., 2016) складається із трансформатора струму (1), вихід якого підключений до входу модуля опрацювання сигналів (2), вхідної шини уставок (3) та вихідної шини управління силовим вимикачем (4), який відрізняється тим, що містить випрямляч струму (5), вхід якого підключений до виходу трансформатора струму (1), а вихід підключений до входу АЦП (6), вихід якого з'єднаний з першим входом логічного елемента "виключає АБО" (7) та входом регістра зсуву (8), вихід якого підключений до другого входу логічного елемента "виключає АБО" (7), вихід якого підключений до входу інтегруючого квадратора (9), вихід якого підключений до першого входу елемента порівняння (10), другий вхід якого з'єднаний з шиною уставки (3), а вихід є керуючим входом силового вимикача (4).

Пристрій працює так: вихідна напруга з вимірювального трансформатора струму (1) подається на входи двохпівперіодного випрямляча (5), після чого поступає на вхід АЦП (6), який формує вихідний унітарний код, в якому число імпульсів відповідає миттєвій амплітуді виміряного струму. Унітарний код з виходу АЦП одночасно подається на вхід БРЗ (8) та один з входів логічного елемента "Виключає АБО", на другий вхід якого подається унітарний код, затриманий в часі на півперіода промислової частоти 50 Гц, тобто на 0,01 с. Отримана на виході логічного елемента "Виключає АБО" (7) модульна різниця між амплітудами текучого та затриманого на півперіода значення струму поступає на вхід інтегруючого квадратора (9), який накопичує суму квадратів різницевих значень струму. У випадку, коли сума квадратів не перевищує заданого порогу у пороговій схемі (10) приймається рішення про відсутність накиду або к.з. у високовольтній лінії електропередачі. У випадку перевищення заданого порогового значення, яке подане на вхідну шину (3), формується сигнал управління потужним високовольтним вимикачем на вихідній шині (4).

Характеристики запропонованого пристрою релейного захисту високовольтних ліній електропередач:

- розширені функціональні можливості;
- висока швидкодія розпізнавання накидів та коротких замикань на інтервалі одного – двох періодів промислової частоти;
- спрощена схема мікроелектронної реалізації пристрою;
- можливість реалізації на кристалі ПЛІС;
- зменшена вартість пристрою та можливість масового тиражування та впровадження на високовольтних підстанціях;
- підвищена надійність та можливість працювати в широкому діапазоні температур.

Технічним результатом наукової розробки є створення малогабаритного, мікроелектронного швидкодіючого пристрою з розширеними функціональними можливостями розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків потужних ПЕД у високовольтних ЛЕП.

Дослідження системних характеристик компонентів пристрою

Трансформатори струму. Вимірювальний трансформатор – це електричний трансформатор, на первинну обмотку якого впливає вимірюваний струм або напруга, а вторинна, знижувальна, включена на вимірювальні прилади і реле захисту застосовують головним чином у розподільних пристроях і ланцюгах змінного струму високої напруги для безпечних вимірів сили струму, напруги потужності, енергії. На випадок пошкодження ізоляції з боку високої напруги один із затисків вторинної обмотки заземляють. З допомогою трансформатора можна вимірювати різні значення електричних величин приладами (вольтметром, амперметром, ватметром) електровимірювань. Схеми включення трансформатора струму в електричний ланцюг показано на рис. 5 та 6.

Первинна обмотка трансформатора струму W_1 (див. рис. 5) включається послідовно в контрольований електричний ланцюг змінного струму I_1 , а вторинна обмотка W_2 – у послідовний ланцюг амперметра або інших вимірювальних приладів. Точність трансформатора струму характеризується вираженням у відсотках відношенням різниці значень приведенного вторинного струму і дійсного первинного струму до дійсного значення первинного струму.

Для вимірів у ланцюгах постійного струму великої сили або високої напруги застосовують трансформатор постійного струму особливої конструкції (рис. 6).

Дія такого трансформатора заснована на насиченні сердечників з феромагнетика за невеликих напруг магнітного поля, внаслідок чого середнє значення змінного струму в допоміжній обмотці стає залежним від вимірюваного постійного струму.

На етапі проектування систем розпізнавання збурень у ЛЕП застосовують, так звані, прохідні трансформатори струму (рис. 7). У такому трансформаторі магнітопровід 3 і вторинна обмотка 2 змонтовані на прохідному ізоляторі 4, який слугує для введення високої напруги в кузов, а роль первинної обмотки трансформатора виконує мідний стрижень 1, що проходить всередині ізолятора.

Умови роботи трансформаторів струму відрізняються від звичайних. Наприклад, розмикання вторинної обмотки трансформатора струму при включеній первинній обмотці неприпустимо, оскільки це спричинить значне збільшення магнітного потоку і, як наслідок, температури сердечника і обмотки трансформатора, тобто вихід з ладу.

При включенні приладів за допомогою вимірювальних трансформаторів виникають похибки двох видів: похибка в коефіцієнті трансформації і кутова похибка (при змінах напруги або струму відношення U_1/U_2 і I_1/I_2 дещо змінюються і кут зсуву фаз між первинною і вторинною напругою і струмами відхиляється від 180°). Ці похибки зростають при понаднормованому навантаженні трансформатора. Кутова похибка впливає на результати вимірювань приладами, покази яких залежать

від кута зсуву фаз між напругою і струмом (наприклад, ватметрів, лічильників електричної енергії та ін.).

Двоперіодний випрямляч. Найбільшого поширення в апаратурі набула однофазна однокатна (місткова) схема випрямляча (рис. 8). Тут первинна обмотка трансформатора вмикається в мережу однофазного змінного струму, а до вторинної обмотки приєднуються чотири випрямні діоди, з'єднані за схемою моста, причому в одну діагональ моста вмикається вторинна обмотка силового трансформатора, в іншу – опір навантаження. Через навантаження випрямлений струм проходить за два півперіоди (див. рис. 8).

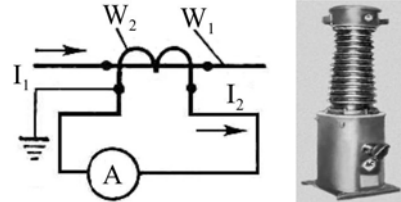


Рис. 5. Вимірювальний трансформатор струму (Схема включення. Зовнішній вигляд трансформатора струму на 115 кВ)

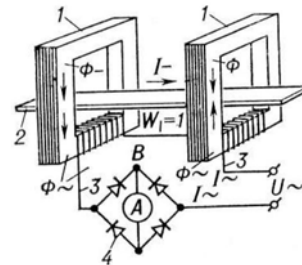


Рис. 6. Схема вимірювального трансформатора постійного струму: 1) сердечник; 2) шина; 3) допоміжна обмотка; 4) діоди випрямного моста; Φ – магнітний потік; U – випрямляч; A – амперметр; W_1 – первинна обмотка (шина); $U \sim$ – допоміжне джерело змінного струму; I – вимірюваний струм

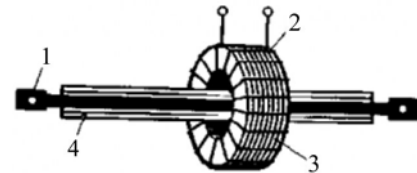


Рис. 7. Прохідний вимірювальний трансформатор струму

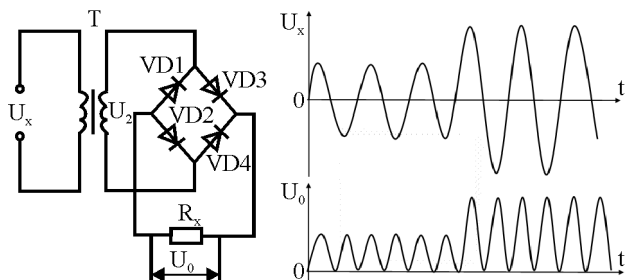


Рис. 8. Однофазна однокатна (місткова) схема випрямляча

Місткова схема випрямляча має низку переваг: у ній краще використовується трансформатор; зворотна напруга на діоді вдвічі менша; конструкція трансформатора простіша (табл. 2).

Табл. 2. Таблиця максимальних значень і характеристик двоперіодних випрямлячів, які випускає фірма Diotec

Тип	Максимальна вхідна напруга, V_{VRMS} [V]	Пік зворотної напруги, V_{VRM} [V]	Пряма напруга, V_F [V] ^{1,2}
CS10D	10	20	< 0.50
CS20D	20	40	< 0.50
CS30D	30	60	< 0.70
CS40D	40	80	< 0.79
CS50D	50	100	< 0.79

Інтегруючий квадратор. Операція піднесення до квадрата в обчислювальній техніці є найбільш складною стосовно до операцій порівняння, сумування, віднімання. Аналіз літературних джерел показує, що для розроблення структурних схем пристроїв піднесення до квадрата в найбільшій мірі їх реалізації стосуються отримання парних добутків $x_i x_j$ у двійковій системі числення.

Реалізація операції піднесення до квадрата може виконуватися на основі аналітичного виразу

$$x \cdot y = \frac{(x+y)^2 - (x-y)^2}{4}.$$

Недоліком таких пристроїв є виконання різнотипних операцій, включаючи додавання, віднімання, піднесення до квадрата і ділення. Тому такі спецпроцесори мають громіздку структуру і низьку швидкодію, яка зумовлена роботою по двох циклах. У першому циклі на інтервалі часу вимірювання параметрів x та y відбувається арифметичне додавання і віднімання кодів, а в другому циклі обчислення добутків у квадраторах.

Ефективним рішенням реалізації унітарного пристрою є застосування алгоритму піднесення до квадрата шляхом сумування непарних чисел (Nikolajchuk & Zeelev, 1980)

$$x \cdot x = \sum_{i=1}^x (2i - 1).$$

Наприклад: $x=7$; $x \cdot x = 1+3+5+7+9+11+13=49$.

На рис. 9 показано структуру пристрою піднесення до квадрата, який реалізує піднесення до квадрата однакових значень унітарних кодів X .

Робота пристрою тактується імпульсами вхідного унітарного коду, по фронту наростання яких відбувається сумування та запис суми кодів, які формуються на виході лічильника L в суматорі суми Σ , а по фронту спаду сумування та формування кодів вхідного числа імпульсів в базисі Радемахера. Перед початком обчислення лічильник та регістр накоплювального суматора скидаються в нульовий стан.

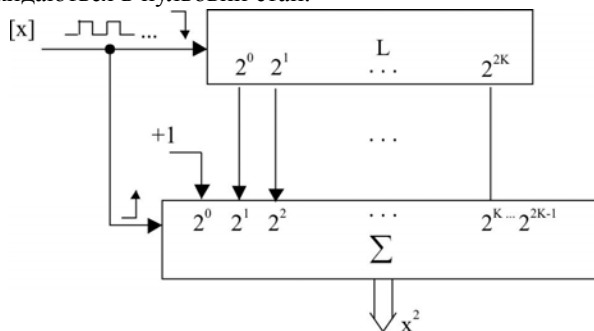


Рис. 9. Структура перемножувача шляхом піднесення до квадрата унітарних кодів (L , Σ – відповідно лічильник та суматор у базисі Радемахера)

У табл. 3 показано формування кодів унітарного квадратора в базисі Радемахера.

Табл. 3. Формування кодів унітарного квадратора в базисі Радемахера ($x=7$)

x	L	$(2x+1)$	Σ
0	000...00	0000...00	000000...00
1	100...00	1100...00	100000...00
2	010...00	1010...00	001000...00
3	110...00	1110...00	100100...00
...
7	111...00	1111...00	100011...00
...

Для ілюстрації імпульсно-квадратичного порогового розпізнавання та ідентифікації коротких замикань спецпроцесором розглянемо приклад.

Нехай після виявлення факту збурення в електромережі реєстрацією цифрового "викиду" значення Z_i на інтервалі часу $t_0 < t < t_0 + \pi/2$ внаслідок появи експоненціальної складової амплітуди струмів після часу $t > t_0 + \pi/2$ реєструються значення $Z_i \neq 0$ у вигляді цифрових різниць $Z_i = |x_i - x_{i-n}|$

(1 3 5 7 7...), що відповідає унітарним кодам:

(1 111 11111 1111111 11111111...).

Відомо (з теорії чисел), що сума непарних чисел дорівнює квадрату їх числа (табл. 4).

Табл. 3. Квадрати суми непарних чисел

Число непарних чисел $[x]$	Сума непарних чисел	X^2
1	1	1
2	1+3	4
3	1+3+5	9
4	1+3+5+7	16
5	1+3+5+7+9	25
6	1+3+5+7+9+11	36
7	1+3+5+7+9+11+13	49
8	1+3+5+7+9+11+13+15	64
9	1+3+5+7+9+11+13+15+17	81
10	1+3+5+7+9+11+13+15+17+19	100
...

У нашому випадку отримаємо:

$$\begin{aligned} & 1 + \underbrace{3+5+7+9+11+13+15+17+19}_{19} + \underbrace{21+23+25+27+29+31}_{27} + \\ & \underbrace{33+35+37+39+41+43+45+47}_{35} + \dots \end{aligned}$$

Тобто: $1+15+65+175+273+\dots = S_i$

На рис. 10 показано графік наростання імпульсно-квадратичної функції S_i .

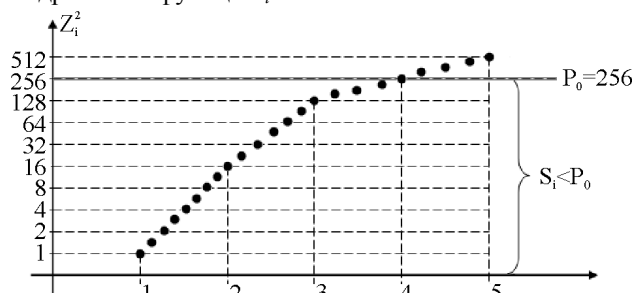


Рис. 10. Наростання ідентифікаційної функції розвитку короткого замикання в електромережах

Структуру спецпроцесора, який обчислює імпульсно-квадратичну функцію S_i , показано на рис. 11.

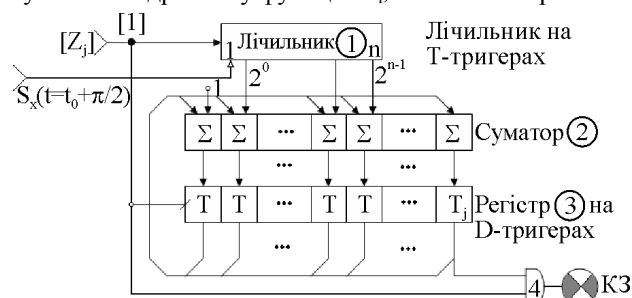


Рис. 11. Структура спецпроцесора обчислення порогового значення імпульсно-квадратичної функції $S_i > P_0$

Робота спецпроцесора виконується згідно з алгоритмом: У момент часу $t = t_0 + \pi/2$ формується сигнал скиду лічильника 1 у нульовий стан, одночасно "0" записується у регістр 3.

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.

У результаті, в накоплювальному регістрі формується код наростаючої імпульсно-квадратичної суми S_i .

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 здійснена 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-бітних відліків на виході АЦП трансформатора струму.

При цьому апаратна складність спецпроцесора становить: $A=10$ (Т-тригерів)+ $20(\Sigma$ -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 "I-HE" на ПЛІС.

Оскільки типові ПЛІС мають число вентилів $5 \cdot 10^6$ і більше, то на одному кристалі можна реалізувати кілька десятків таких спецпроцесорів, з урахуванням структур АЦП та багаторозрядних регістрів зсуву для паралельного контролю та реєстрації збурень типу коротких замикань, накидів та пусків ПЕД на електричних підстанціях з великим числом приєднань.

Можливо зробити спеціальний процесор на одному кристалі чи корпусі, який буде випрямляти синусоїду на виході трансформатора струму, мати АЦП-однополярний кристал, регістри зсуву і логічні елементи, два однорозрядні накопичувальні суматори, генератор унітарних кодів і спецпроцесор-квадратор з виходом, який ідентифікує коротке замикання у процесі його розвитку

на інтервалі менше одного періоду. Ці спецпроцесори можуть бути емульовані на типовому сигнальному однокристальному процесорі шляхом його програмування згідно з розробленим алгоритмом.

Висновки. Викладено теоретичні засади та методологію реалізації захисту високовольтного обладнання ЛЕП. Відображено алгоритм ідентифікації запусків ПЕД, коротких замикань та накидів. Розроблено методи опрацювання та розпізнавання накидів та коротких замикань у ЛЕП на основі цифрового опрацювання сигналів. Розглянуті пристрої можуть бути широко застосовані на підприємствах, а методи діагностики, які використовуються в них, на цей час є одними з перспективних методів контролю за роботою електрообладнання високовольтних ЛЕП.

Перелік використаних джерел

- Djakov, A. F., & Ovcharenko, N. I. (2000). *Mikroprocessornaja relejnaja zashhita i avtomatika jelektroenergeticheskikh sistem*. Moscow: Jenergoatomizdat, 199 p. [in Russian].
- Kidyba, V. P. (2015). *Releinyi zakhyst elektroenerhetychnykh sistem*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 504 p. [in Ukrainian].
- Liura, O., Ostrovka, I., Sabadash, I., & Nykolaichuk, Y. (2016). Theoretical Principles and Methods of Distortions Recognition in Load Surges, Short Circuits and Powerful Electric Drives Launching *Type Power Lines Proceedings of the XIII the International Conference TCSET'2016*, 33–36.
- Principy postroenija. (2000). *Mikroprocessornye ustrojstva relejnoj zashhity, avtomatiki i distancionnogo upravljenija*. Kiiv, 39 p. [in Russian].
- Nikolajchuk, Ya. N., & Zevelev, S. Ya. (1980). *Chisloimpulsnoe mnozhitelnoe ustrojstvo*. A.S. №754414. Bjulleten №29. [in Russian].
- Nykolaichuk, Ya. M., Vozna, N. Ya., Liura, O. P., Ostrovka, I. I., & Sabadash, I. I. (2016). Patent 103938 Ukraina MPK N02N 9/00 (2015.01) *Prystrij releinoho zakhystu vysokovolnykh liniy elektroperedach* №u201505713; zaiavl.09.06.2015; opubl.12.01.2016, Biul. №1/2016. [in Ukrainian].
- Sabadash, I. O. (2011). Novitni mikroprotsesorni tekhnolohii v ekspluatatsii merezh 6-36 kV. *Jelektrycheskye sety y systemy*, 6, 35–39. [in Ukrainian].
- Vozna, N. Ya., & Liura, O. P. (2015). Metod strukturmoho rozpoznavannia nakydiv ta korotkykh zamykan v LEP. *Materialy II Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Informatsiini tekhnolohii v osviti, tekhnitsi ta promyslovosti"*, (pp. 180–181). Ivano-Frankivsk. [in Ukrainian].

О. П. Люра¹, Н. Я. Возна²

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина

²Тернопольский национальный экономический университет, г. Тернополь, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Разработаны быстродействующие алгоритмы (максимум 1-2 периода промышленной частоты) выявления и инвариантной идентификации переходных процессов в линиях электропередач (ЛЭП) типа накидов, коротких замыканий и запуска мощных электроприводов (МЭД), на основе которых определены функции устройства релейной защиты высоковольтных линий электропередач. Представлена структура малогабаритного, микроэлектронного быстродействующего устройства релейной защиты с расширенными функциональными возможностями распознавания накидов и защиты высоковольтных ЛЭП от коротких замыканий, осуществлен синтаксис его функций. Это позволило успешно применять разработанный метод и устройство для одновременного распознавания накидов, коротких замыканий и пуска мощных электроприводов. Изложена информационная технология проектирования структурных решений спецпроцессора релейной защиты высоковольтных линий электропередач. Систематизированы существующие средства релейной защиты на основе аппаратных и программно-аппаратных микропроцессорных контроллеров цифровой защиты. Классифицированы компоненты спецпроцессора и обоснованы их характеристики, ориентированные на линии электропередач 6 кВ. Продемонстрированы временные диаграммы выпрямленных значений фазных напряжений, тока и разности фаз $\Delta\varphi$ при накидах, коротких замыканиях и запусках мощных электродвигателей в высоковольтных ЛЭП.

Ключевые слова: диагностика; накид; короткое замыкание; электрическое оборудование; спецпроцессор; распознавание.

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE COMPONENTS OF MICROELECTRONIC DEVICES OF RELAY IN HIGH-VOLTAGE LINES

An actual task at creation of the modern informative checking of technological parameters systems and creation of devices of quality control is development of theoretical principles of the cross-correlation working of harmonic signals that describe the technological parameters of objects. The especially important task of recognition of harmonic signals is authentication of their distortions in the high-voltage power systems in the case of occurring of short circuits, that causes the change of their cross-correlation and spectral descriptions. The fast-acting algorithms (at most 1-2 periods of industrial frequency) of exposure and invariant authentication of transients are worked out in the lines of electricity transmission (LET) as load surge, short circuits and start of powerful electric engines (PEE) on the basis of that the functions of relay defence device of high-voltage lines of electricity transmission. The given structure of a small, microelectronic fast-acting device of relay defence is with the extended functional possibilities of recognition of load surge and defence of high-voltage lines of electricity transmission from short circuits, the syntax of his functions is carried out. This device can be used for recognition of load surge and short circuits of invariant to the size of increase currents in the separate phases of electric lines. It allowed successfully applying the worked out method and a device for simultaneous recognition of load surge, short circuits and starting of powerful electromechanics engines. The information technology of designing structural solutions of relay protection special processor for high-voltage electricity transmission lines is presented. Existing means of relay protection based on hardware and software-hardware microprocessor controllers of digital protection are systematized. Special processor components are classified and their characteristics referring to 6 kV electricity transmission lines are substantiated. The paper has shown sentinel diagrams of the straightened values of phase tension, current and difference of $\Delta\phi$ phases at load surge, short circuits and start of powerful electric motors in high-voltage lines of transfer electricity.

Keywords: diagnostic; disturbance load surge; short circuit; electric equipment; special processor; identification.