

МІНІМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ НАСИЧЕННЯ МАГНІТОПРОВІДІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ НА ТОЧНІСТЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРИФАЗНИХ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ З ЦИФРОВИМ ВИХОДОМ

В.І. Паньків¹, канд.техн.наук., Є.М. Танкевич^{1*}, докт.техн.наук, С.Є. Танкевич^{2**}, канд.техн.наук

¹Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: tankevichen@ukr.net

²ТОВ «ДТЕК Мерезжі»,

вул. Сім'ї Хохлових, 8, ЛІТЕРА 20Д, Київ, 04119, Україна

Виконано класифікацію та визначено характеристики, можливості та недоліки відомих методів програмної корекції вихідного струму однофазного первинного вимірювального каналу (ПВК) струму. Запропоновано дискретизовану модель струму короткого замикання (КЗ). Розроблено метод та алгоритм підвищення точності трифазного ПВК струму в перехідних режимах електроенергетичних систем (ЕЕС) за насичення магнітопроводів його фазних ТС. Достовірність розробленого методу підтверджено шляхом імітаційного моделювання вихідного струму ПВК за міжфазного КЗ фаз А та В без корекції та з корекцією його фазних струмів. Показано, що розроблений метод дає змогу зменшити повну похибку ПВК в перехідних режимах ЕЕС за насичення магнітопроводів ТС з 70-90% до 6-15%. Бібл. 47, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: вимірювальний канал, цифровий вихід, трансформатор струму, насичення, сигнал, цифрова обробка, метод, точність.

Вступ. Високовольтні трифазні первинні вимірювальні канали (ПВК) струму призначені для розв'язання однієї з основних задач практичної реалізації систем комплексної автоматизації (СКА) електроенергетичних об'єктів (ЕЕО) – одержання з потрібною точністю, швидкістю та надійністю кількісної інформації щодо контрольованих процесів в первинній мережі, її попередньої обробки і введення в наступні структурні компоненти спеціалізованих пристроїв цих систем [1]. Являючись основними і найбільш поширеними засобами одержання та формування єдиної інформаційної бази даних СКА ЕЕО (розподільчих пристроїв електричних станцій, високовольтних електричних підстанцій електроенергетичних систем (ЕЕС)), ПВК струму значною мірою визначають їхній технічний рівень і ефективність функціонування комплексів та систем усіх наступних ієрархічних рівнів управління ЕЕС, що є одним з вирішальних чинників ефективного та надійного функціонування електроенергетичної галузі країни в цілому, що набуває додаткової актуальності в умовах функціонування нового ринку електричної енергії [2-4].

Структура ПВК струму з цифровим виходом поєднує в собі три типи вимірювальних перетворювачів: аналогові, аналого-цифрові та цифрові. Найбільш вагомими з точки зору одержання достовірної кількісної інформації про істинні значення вимірюваних величин струму ЕЕО є первинні вимірювальні перетворювачі, що безпосередньо сприймають вимірювані сигнали, тобто фазні трансформатори струму (ТС). Для цих складних і відповідальних апаратів головний інтерес являє їхня робота в перехідних режимах ЕЕС, особливо в тих, що спричинені короткими замиканнями (КЗ). Адже тут йдеться про вимірювання перехідних струмів КЗ, які значно перевищують струми нормального режиму та характеризуються нестационарними сигналами. В значній кількості випадків крім періодичної складової вони містять й аперіодичну, вищі гармоніки та високочастотний шум, які розглядаються як завади, що можуть спричинити зміну параметрів ТС та їхні підвищені похибки. Аперіодична складова струму КЗ може викликати насичення магнітопроводів ТС і, відповідно, зумовити спотворення їхніх вторинних струмів. Крім того, накопичена залишкова індукція, яка зазвичай присутня в магнітопроводах ТС, також вносить певні корективи у відтворення вторинного струму ТС в таких режимах. Сукупний вплив цих явищ може привести до помилкових дій у роботі пристроїв моніторингу, захисту, автоматики та керування високовольтних підстанцій [5]. Тому в усі часи задача забезпечення прийнятної точності вимірювання струму КЗ була актуальною для побудови і функціонування зазначених систем. Особливого значення вона набула у зв'язку з переходом цих систем на нову мікропроцесорну елементну базу та їхніми новими функціональними можливостями, які з'явилися при цьому. За таких умов вимоги до точності вхідної інформації мікропроцесорних систем постійно зрос-

тають, а їхнє забезпечення на основі використання відомих підходів, методів і засобів, що ґрунтуються на конструктивному вдосконаленні ТС або на використанні електронних коригуючих пристроїв, приєднаних до їхніх вторинних обмоток [6-11], стало неефективним або неможливим. Сьогодні, як показано далі, найбільш перспективним шляхом розв'язання цієї задачі є корекція вихідних струмів ПВК з використанням сучасних методів цифрової обробки сигналів.

Отже, **метою роботи** є аналіз характеристик та особливостей відомих методів мінімізації впливу насичення магнітопроводів ТС на точність ПВК і розробка методу підвищення точності трифазного ПВК за умов насичення магнітопроводів ТС та наявності залишкової індукції в них.

Аналіз відомих методів мінімізації впливу насичення ТС на точність ПВК з використанням цифрової обробки сигналів. Насамперед зазначимо, що в усіх закордонних публікаціях цього спрямування розглядається ТС з цифровим представленням його вторинного струму (ТС з цифровим виходом), який по суті є однофазним ПВК. Однак поняття ПВК в них, на відміну від вітчизняних публікацій, як таке не використовується. Аналіз значної кількості цих праць показав, що усі розглянуті в них методи можна умовно розділити на декілька груп. *Методи першої групи* передбачають використання різного типу моделей ТС (з різним представленням контуру намагнічування) для визначення струму намагнічування в періодах насичення магнітопроводу ТС та його додавання до фактичного вимірюваного вторинного струму ТС [12-18]. Так в [12-15, 19] для моделювання контуру намагнічування ТС пропонується використовувати безгістерезисну характеристику намагнічування (ХН), яка представлена кусково-лінійною апроксимацією; в [18] для цього використано безгістерезисну ХН з її представленням поліномом 3, 5 та 7-го степенів, і сталий опір, що характеризує втрати в сталі магнітопроводу (на гістерезис та вихрові струми). В методі [16] в моделі ТС задіяно ХН, апроксимовану двома прямими відрізками; в [17] ХН представлено простою дробовою формулою з двома невідомими коефіцієнтами (рівняння Фроліха); в [18] – поліномом зі степенями 1, 5 та 33. Як показано в [16], апроксимація ХН розглянутими способами не завжди дає можливість точно їх описати та часто може супроводжуватися осциляціями, які негативно впливатимуть на адекватність моделі ТС і точність корегування струму.

Невід'ємною та важливою операцією методів цієї групи є оцінювання початкового потоку в магнітопроводі ТС (залишкової індукції), який, як і спосіб апроксимації ХН, визначає достовірність визначеного струму похибки за допомогою моделі ТС і значно впливає на точність корекції вихідних струмів ПВК. В [12, 13] цей потік оцінюється як інтегральна характеристика дискретного потоку за повний період відповідно до запропонованої там формули. Після знаходження потоку, за допомогою апроксимованої ХН, визначається перше значення струму намагнічування, який додається до фактичного вторинного струму ТС. Далі за допомогою коректованого вторинного струму ТС розраховується значення потоку в магнітопроводі і, відповідно, нове значення струму намагнічування. Ця процедура повторюється до тих пір, поки триває насичення. При цьому зазначимо, що розрахунок початкового потоку відповідно до формули, запропонованої в [12, 13], як стверджується в [15], є припустимим тільки за умови відсутності залишкової індукції в магнітопроводі ТС. В [14, 15, 19] для оцінювання початкового потоку використовується прогнозоване значення вибірки вторинного струму у разі насичення ТС, яке вважається відкоректованим. Для його розрахунку використано методи функції другої [14, 15] та третьої різниці [19] вторинного струму. Подальші кореговані вибірки вторинного струму отримуються за тією ж процедурою, що й в [12, 13]. Яким чином враховується початковий магнітний потік під час коригування значень струму методами викладеними в [16, 17], невідомо.

Отже, можна стверджувати, що ця група методів в значній мірі залежить від способу представлення контуру намагнічування магнітопроводу в моделі ТС, параметрів моделі (характеру та значення вторинного навантаження, коефіцієнта трансформації) та початкових умов (урахування значення залишкової індукції в магнітопроводі), які необхідні для побудови будь-якої достовірної моделі ТС, і тому не можуть бути універсальними методами корегування вихідних струмів ПВК в режимі КЗ в електроенергетичних системах (ЕЕС).

Методи другої групи передбачають використання різних за складом і точністю моделей струму КЗ і різної кількості фактичних вимірних вибірок вторинного струму ТС, які належать до ненасиченої його частини, для розрахунку коригованих вибірок з подальшою заміною ними вибірок насиченої частини цього струму [20-33]. А саме, m вибірок ненасиченої частини вторинного струму дають можливість скласти систему m рівнянь і визначити $n \leq m$ параметрів обраної моделі струму КЗ. Як невідомі в моделі струму КЗ використовуються амплітуди його періодичної та аперіодичної складових, стала часу та фаза виникнення пошкодження [28, 31]; амплітуда періодичної складової основної частоти, момент виникнення пошкодження та параметри вищих гармонік, які обмежуються кутвою

частотою зрізу низькочастотного згладжувального фільтру ПВК [29]; амплітуди періодичної та аперіодичної складових та фаза виникнення пошкодження [24]; затухаючі періодична та аперіодична складові основної частоти [30].

В [22, 28, 29] використовуються моделі струму КЗ, в яких аперіодична складова моделі лінеаризується шляхом розкладу в ряд Тейлора

$$e^{-\frac{t}{T_1}} = 1 - \frac{t}{T_1} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{T_1}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{T_1}\right)^3 + \frac{1}{4!} \left(\frac{t}{T_1}\right)^4 + \dots$$

або в дискретному представленні

$$e^{-\frac{n*\Delta T}{T_1}} = 1 - \frac{1}{T_1} + \frac{1}{2!} \left(\frac{n*\Delta T}{T_1}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{n*\Delta T}{T_1}\right)^3 + \frac{1}{4!} \left(\frac{n*\Delta T}{T_1}\right)^4 + \dots,$$

де $t = n * \Delta T$, n – номер вибірки, ΔT – період дискретизації та відбору його перших декількох членів – двох [28], трьох [29] та чотирьох [22] для її представлення в моделі струму КЗ.

На рис. 1 показано апроксимацію аперіодичної складової струму КЗ зі сталою часу $T_1 = 0.1$ с, приведена до початкового значення (крива 1) її лінеаризованими аперіодичними складовими з різною кількістю прийнятих до уваги членів ряду Тейлора (пряма лінія 2 – два перших члени ряду; крива 3 – три перших члени ряду; крива 4 – чотири перших члени ряду Тейлора). Як видно з рис. 1, жодна з продемонстрованих лінеаризацій аперіодичної складової не здатна її апроксимувати. У подальшому такі відхилення вносять значні похибки в розрахунок параметрів моделі струму КЗ методом найменших квадратів (МНК), отже це значний недолік методів, запропонованих в цих працях.

Хоча лінеаризація аперіодичної складової з урахуванням більшої кількості членів ряду Тейлора надає можливість точніше апроксимувати аперіодичну складову струму КЗ, проте в даному разі виникає проблема, пов'язана безпосередньо з обчислювальним процесом. Так, у випадку достатньо високих частот дискретизації АЦП ПВК, наприклад, 3200 чи 6400 Гц, періоди дискретизації ΔT становитимуть відповідно 0.0003125 та 0.00015625 с та через піднесення їхніх значень до 3-ї степені (чисельник четвертої складової розкладу експоненти в ряд Тейлора ($n^3 * \Delta T^3$) у виразі (1)) призведе до значного зростання кількості десяткових розрядів дробового числа, що у разі обертання матриці, де ці числа фігуруватимуть як коефіцієнти при невідомих, призведе до сингулярності розв'язку.

Щодо кількості фактичних виміряних вибірок вторинного струму ТС, які використовуються для визначення параметрів моделі струму КЗ, встановлено наступне. В [31] для моделі з чотирма невідомими використовуються чотири вибірки вторинного струму ТС, які не належать його насиченій частині. У разі фіксації більшої кількості вибірок ненасиченої частини для визначення параметрів струму КЗ у [25] запропоновано використовувати генетичний алгоритм. У [28] для визначення параметрів моделі, представленої у лінеаризованій формі з чотирма невідомими, використовують вибірки ненасичених частин струму двох послідовних періодів. Розв'язок одержаної при цьому надлишково-визначеної системи, в якій 6 невідомих та $m > 6$ рівнянь, виконується методом найменших квадратів.

Отже, методам цієї групи теж властиві певні недоліки: низька точність через низьку точність використовуваних моделей струму КЗ [22, 28, 29]; недостатність чи відсутність обґрунтування вибору структури моделі [24, 30]; складність визначення параметрів моделі через незабезпечення рівнозначності системи рівнянь (рівності кількості невідомих кількості вибірок, що належать ненасиченій частині вторинного струму ТС) [28].

Третю групу складають комбіновані методи, в яких одночасно використовуються модель ТС і модель струму КЗ. Так, в [18] використано модель струму КЗ, отриману шляхом тригонометричних перетворень його періодичної складової та розкладу аперіодичної складової в ряд Тейлора з обмеженням двох перших його складових (в сукупності функція чотирьох невідомих), для побудови регресійної моделі первинного струму ТС. Для розрахунку фактичних вибірок вторинного струму ТС задіяна його модель, в якій ХН представлено поліномом зі степенями 1, 5 та 33 і яка передбачає вра-

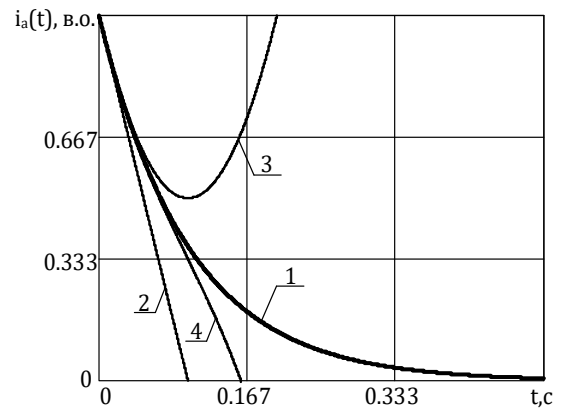


Рис. 1

хування залишкової індукції (п'ята невідома) в магнітопроводі ТС. Повна регресійна модель являє собою нелінійну регресійну модель, яка є функцією п'яти вищезгаданих невідомих.

Метод мінімізації впливу насичення магнітопроводів ТС на точність трифазного ПВК струму. Виходячи з проведеного аналізу характеристик, особливостей і недоліків розглянутих вище методів приходимо до висновку, що найбільш перспективним задля досягнення поставленої в роботі мети є використання методів, які ґрунтуються на використанні математичної моделі струму КЗ та цифровій обробці вихідних струмів ПВК. Відповідно до теоретичних засад методів цієї групи розроблений метод повинен інтегрувати в собі цілий ряд систематизованих кроків, спрямованих на: найшвидше виявлення КЗ і точне визначення початку входження магнітопроводу ТС у стан насичення; точний розрахунок параметрів моделі струму КЗ; визначення затримки часу виявлення КЗ і корекцію спотвореного вихідного струму ПВК. Алгоритм методу мінімізації впливу насичення магнітопроводів ТС на точність ПВК для однієї фази подано на рис. 2.

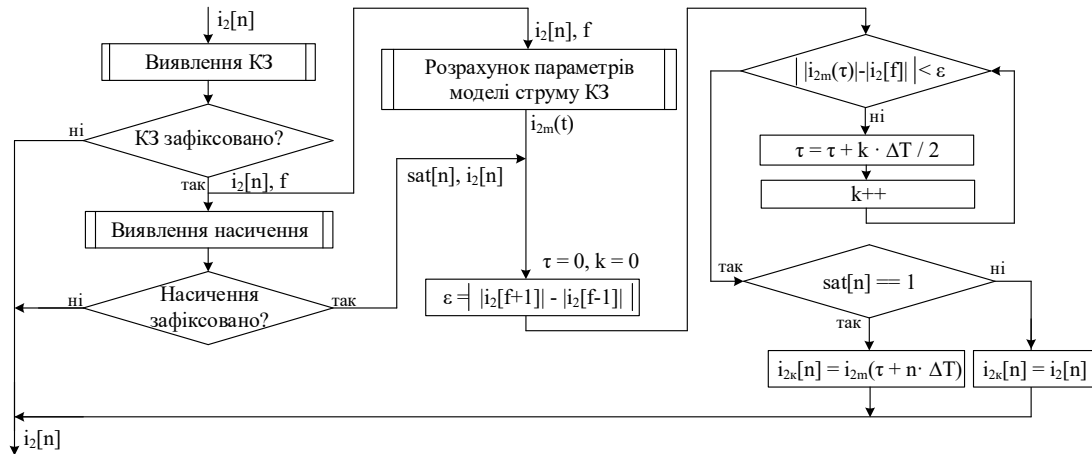


Рис. 2

Розглянемо суть та дію кожного з кроків алгоритму. Насамперед зазначимо, що метод передбачає безперервну реєстрацію дискретизованого струму ПВК $i_2[n]$ кожної з фаз та їхній безперервний аналіз алгоритмом виявлення КЗ.

Виявлення КЗ. Загалом, існує велика кількість методів, які можна використати для виконання функції виявлення КЗ. Всі вони відрізняються задіяними в них математичним апаратом, кількістю та типом використовуваних сигналів для виявлення КЗ та певною математичною чи фізичною величиною, що використовується для контролю. Умовно їх можна розділити на чотири групи: методи, що базуються на моделях об'єктів захисту та їхніх особливостях [34, 35]; на аналізі частотного вмісту вхідних сигналів [34, 36, 37]; на особливостях форми та моделі вхідного сигналу [25, 35, 36, 38, 39, 40]; на аналізі та порівнянні значень вибірок вхідних сигналів [34, 41-44]. Кожний з цих методів оперує своїм власним вікном даних для отримання інформації про те, відбулось КЗ чи ні, а їхні алгоритми характеризуються певною тривалістю обчислювального процесу, що впливає на швидкість виявлення КЗ. У зв'язку з цим їх також поділяють на швидкодіючі, з тривалістю виявлення КЗ в межах одного періоду основної частоти ЕЕС після виникнення КЗ; з дуже швидким виявленням КЗ (тривалість виявлення в межах половини періоду основної частоти ЕЕС) та методи з ультрашвидким виявленням КЗ (тривалість виявлення в межах чверті періоду основної частоти ЕЕС) [34].

Основна та найважливіша вимога до вибору методу та реалізації відповідного йому алгоритму виявлення КЗ полягає в забезпеченні його швидкодії. В ідеальному випадку алгоритм обраного методу повинен виконувати свою функцію в межах чверті періоду основної частоти енергосистеми. Навіть якщо обрано ультрашвидкий метод виявлення КЗ, слід розуміти, що номер вибірки f , визначений методом виявлення КЗ на його початок, не відповідає реальному моменту його виникнення. Тому що будь-який метод виявлення КЗ робить остаточну оцінку, що КЗ відбулося, з певною затримкою. Це пов'язано, насамперед, з математичним апаратом методу та певними додатковими перевірками, які надають змогу чітко розмежувати доаварійний та аварійний режими енергосистеми. Таким чином, реальний момент КЗ є зсунутим у часі на певну затримку τ відносно моменту виявлення КЗ, що відповідає вибірці f , яка практично є початком відліку події КЗ.

У випадку, якщо КЗ зафіксовано, то в залежності від характеристик та можливостей процесора використовуваного контролера можливі два варіанти реалізації даного методу, а саме: виконання

розрахунків за допомогою синхронного та асинхронного програмування. Найбільш продуктивна реалізація методу можлива саме за виконання асинхронних розрахунків відповідно до алгоритму рис. 2, де передбачено запуск дії трьох його гілок асинхронно в двох потоках процесора (основному та паралельному). Оцінка чи ввійшов магнітопровід фазного ТС у стан насичення та обчислення тривалості спотворення фазного струму на виході ПВК виконуються в основному потоці. Результатом такої оцінки є послідовність бінарного сигналу $sat[n]$, що описує періоди, де струм $i_2[n]$ є спотвореним.

Виявлення насичення магнітопроводів ТС здійснюється за розробленим авторами методом та алгоритмом онлайн визначення періодів їхнього насичення, що ґрунтуються на використанні точної математичної моделі електромагнітних процесів у ПВК струму за умов КЗ в ЕЕС і цифровій обробці вихідних струмів ПВК методом дискретних перетворень Фур'є [45].

Розрахунок параметрів струму КЗ виконується за побудованою авторами дискретною моделлю струму однієї фази на виході ПВК $i_2[n]$ у складі аперіодичної $i'_a[\Delta T * n]$ та періодичної складових основної частоти енергосистеми $i'_n[\Delta T * n]$, спектра невідфільтрованих аналоговим фільтром через обмеженість його кутової частоти зрізу вищих гармонік (ВГ) $i'_{гф}[\Delta T * n]$ і завад $i'_{шф}[\Delta T * n]$, що залишилися після фільтрації струму цим фільтром через неідеальність його ЧХ

$$i_2[n] = i'_a[\Delta T * n] + i'_n[\Delta T * n] + i'_{гф}[\Delta T * n] + i'_{шф}[\Delta T * n] =$$

$$= I'_m \cos(\varphi_{кз}) e^{-\frac{\Delta T * n}{T_1}} - I'_m \cos(\varphi_{кз}) * \cos(\omega * \Delta T * n) + -I'_m \sin(\varphi_{кз}) * \sin(\omega * \Delta T * n) +$$

$$+ \sum_{f=2}^{f=F} I'_{mf} \sin(\omega_f * \Delta T * n + \theta_f) + i'_{шф}[\Delta T * n],$$
(1)

де ΔT – період дискретизації аналого-цифрового пристрою (АЦП) ПВК; n – номер вибірки дискретизованого струму; I'_m – амплітудне, приведене до вторинної обмотки ТС значення струму КЗ основної частоти енергосистеми; $\varphi_{кз}$ – фаза струму КЗ; T_1 – стала часу струму КЗ; I'_{mf} , θ_f – амплітудні значення та початкові фази спектра невідфільтрованих ВГ; ω , ω_f – основна частота енергосистеми та частоти невідфільтрованих ВГ; F – кількість ВГ, що містяться в струмі після проходження через аналоговий фільтр.

Побудована модель струму КЗ передбачає: фіксацію вибірок фактичного струму КЗ $i_2[n]$ для фази ПВК одразу ж після виявлення КЗ в ЕЕС, що відповідає номеру вибірки f ; формування кумулятивним чином від трьох до шести вікон даних з зафіксованих вибірок відповідно до схеми відбору вибірок, представленої на рис. 3; розв'язання лінійної постановки методу найменших квадратів з даними кожного вікна та має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} a_1[f] & a_2[f] & 1 \\ a_1[f+1] & a_2[f+1] & 1 \\ a_1[f+2] & a_2[f+2] & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ a_1[p] & a_2[p] & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_2[f] \\ i_2[f+1] \\ i_2[f+2] \\ \dots \\ i_2[p] \end{bmatrix},$$

де x_1 , x_2 , x_3 – невідомі, отримані з моделі (1) ($x_1 = -I'_m \cos(\varphi_{кз})$, $x_2 = I'_m \sin(\varphi_{кз})$ – складові комплексного амплітудного значення струму КЗ основної частоти; x_3 – сума аперіодичної складової невідфільтрованих ВГ та невідфільтрованих завад моделі); $a_1[n]$ та $a_2[n]$ – коефіцієнти при невідомих, які є змінними у часі та визначаються як $a_1[n] = \cos(\omega * \Delta T * n)$, $a_2[n] = \sin(\omega * \Delta T * n)$.

Розв'язок описаної системи рівнянь в матричному вигляді має вигляд

$$[x] = [a[n]]^\dagger * [i_2[n]],$$
(2)

де $[x]$ – масив невідомих; $[i_2[n]]$ – масив значень вибірок сформованого вікна даних; $[a[n]]^\dagger$ – псевдо-обернена матриця коефіцієнтів при невідомих, яка визначається як

$$[a[n]]^\dagger = [[a[n]]^T * [a[n]]]^{-1} * [a[n]]^T.$$

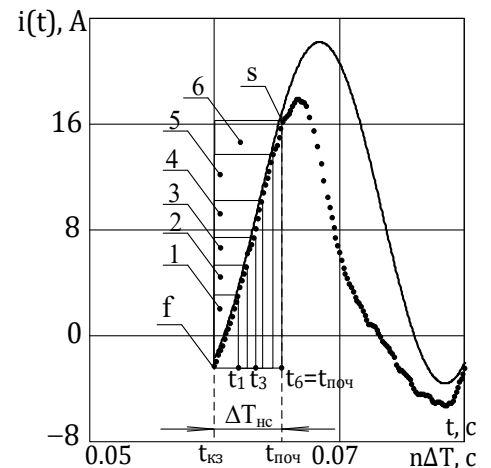


Рис. 3

Знаходження розв'язку системи рівнянь (2) для M сформованих вікон даних (рис. 3), дає можливість розрахувати параметри домінуючих аперіодичної та періодичної складових моделі (1) струму КЗ

$$I'_{m1} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}; \varphi_{кз} = \arctg\left(\frac{x_2}{x_1}\right); T_1 = \frac{M * \sum_{m=1}^M t_m^2 - \left(\sum_{m=1}^M t_m\right)^2}{M * \sum_{m=1}^M (t_m * \ln(x_3(m))) - M * \sum_{m=1}^M t_m * \sum_{m=1}^M \ln(x_3(m))}.$$

За асинхронної реалізації розрахунків оцінка параметрів струму КЗ виконується в паралельному потоці одразу ж після виникнення КЗ. Одразу ж після оцінки параметрів струмів КЗ фаз в цьому ж потоці формується модель миттєвого струму

$$i_{2m}(t) = I'_{m1} \cos(\varphi_{кз}) e^{-\frac{t}{T_1}} - I'_{m1} \cos(\omega t + \varphi_{кз}). \quad (3)$$

Відповідно до цієї моделі відбуватиметься корекція спотвореного струму на виході ПВК.

Визначення затримки часу τ виявлення КЗ є важливою для правильної заміни вибірок, що належать періодам, де вибірки струму є спотвореними в наслідок насичення магнітопроводу ТС, оскільки це дасть змогу виконувати заміну вибірок за реальних початкових умов. Практично таку задачу можна записати як пошук значення часу затримки τ , яке задовольнило б умову: $||i_{2M}(\tau) - |i_2[ff]|| \rightarrow \min$ або іншими словами $||i_{2M}(\tau) - |i_2[ff]|| < \varepsilon$, де ε – максимально допустиме відхилення абсолютного значення вибірки струму на виході АЦП ПВК $i_2[n]$ від відповідного абсолютного значення моделі струму КЗ $i_{2M}[\tau]$, починаючи з нульових початкових умов моделі $i_{2M}(0)$.

Корекція спотвореного вихідного струму ПВК. За умов встановлення того, що хоча б один з магнітопроводів ТС ПВК увійшов в насичення (про що свідчитиме наявність логічних «1» в бінарних сигналах $sat[n]$ відповідних фаз, оцінених методом виявлення насичення в основному потоці), розрахованих параметрів моделей струмів КЗ, визначених затримок часу τ в паралельному потоці, заміна вибірок на періодах, де вторинний струм ТС є спотвореним, вибірками, отриманими з моделі (3), виконуватиметься наступним чином:

$$i_k[n] = \begin{cases} i_2[n], & \text{якщо } sat[n] = 0; \\ i_{2m}(\tau + n * \Delta T), & \text{якщо } sat[n] = 1. \end{cases} \quad (4)$$

У випадку реалізації методу лише в основному потоці процесора, тобто використовуючи синхронне програмування, одразу ж після виявлення КЗ запускається метод виявлення насичення магнітопроводів ТС. Тільки після встановлення ним того, що відбулося насичення, запускається алгоритм визначення параметрів струмів КЗ фаз та відповідних оцінок часу затримки τ і подальшої корекції значень вибірок струмів на періодах спотворення вторинного струму вибірками, отриманими з відповідних моделей відповідно до виразу (3).

Приклад мінімізації впливу насичення ТС на точність трифазного ПВК струму. Ефективність нового методу продемонстровано моделюванням електромагнітних процесів в трифазному ПВК з використанням його моделі, розробленої в програмному середовищі Matlab Simulink, для випадку міжфазного КЗ фаз A і B у високовольтній мережі за наступних параметрів струму: діюче значення доаварійного струму в усіх фазах $I_{1m} = 2$ кА (номінальний струм ТС); момент виникнення КЗ у фазі A $\varphi_{кз} = 30^\circ$, фазі B $\varphi_{кз} = 210^\circ$; діюче значення періодичної складової струму КЗ $I_{1m\text{ кз}} = 8$ кА; стала часу первинного кола $T_1 = 0.15$ с. В струмі КЗ присутні завади у вигляді білого Гаусового шуму з показником відношення сигналу до рівня шуму рівним 15 дБ.

До складу ПВК входить група трьохфазних ТС типу ТФКН-330, значення вторинних навантажень становили $R_a = 25$ Ом; $R_b = 30$ Ом; $R_c = 24$ Ом; значення залишкової індукції в МП ТС $B_{ra} = 0.6$ Тл (75% B_{rmax}); $B_{rb} = 0.45$ Тл (56.3% B_{rmax}); $B_{rc} = -0.35$ Тл (43.8% B_{rmax}). Як модель аналогового фільтру ПВК використано модель цифрового фільтру Баттерворта четвертого порядку. Моделювання АЦП виконано шляхом лінійної інтерполяції відфільтрованих даних та відбором вибірок струмів з рівним періодом (періодом дискретизації) відповідно до частоти дискретизації 6400 Гц.

На рис. 4 наведено результати експериментальної перевірки розробленого методу мінімізації впливу насичення ТС на точність трифазного ПВК струму, де для кожної фази показано етапи перетворення приведених фазних струмів КЗ $i'_1(t)$ в ПВК, розраховано вторинні струми ТС $i_2(t)$, відфільтровано струми $i_{2\phi}(t)$, дискретизовано струми $i_2(n)$, бінарні сигнали, що вказують на виявлене КЗ $f[n]$, власне струми КЗ $i_{2кз}(n)$, бінарні сигнали, що описують періоди спотворення струму ТС $sat[n]$ за насичення його магнітопроводу, та вибірки струму $i_{2нс}(n)$, що належать періодам, де цей струм не є спотвореним.

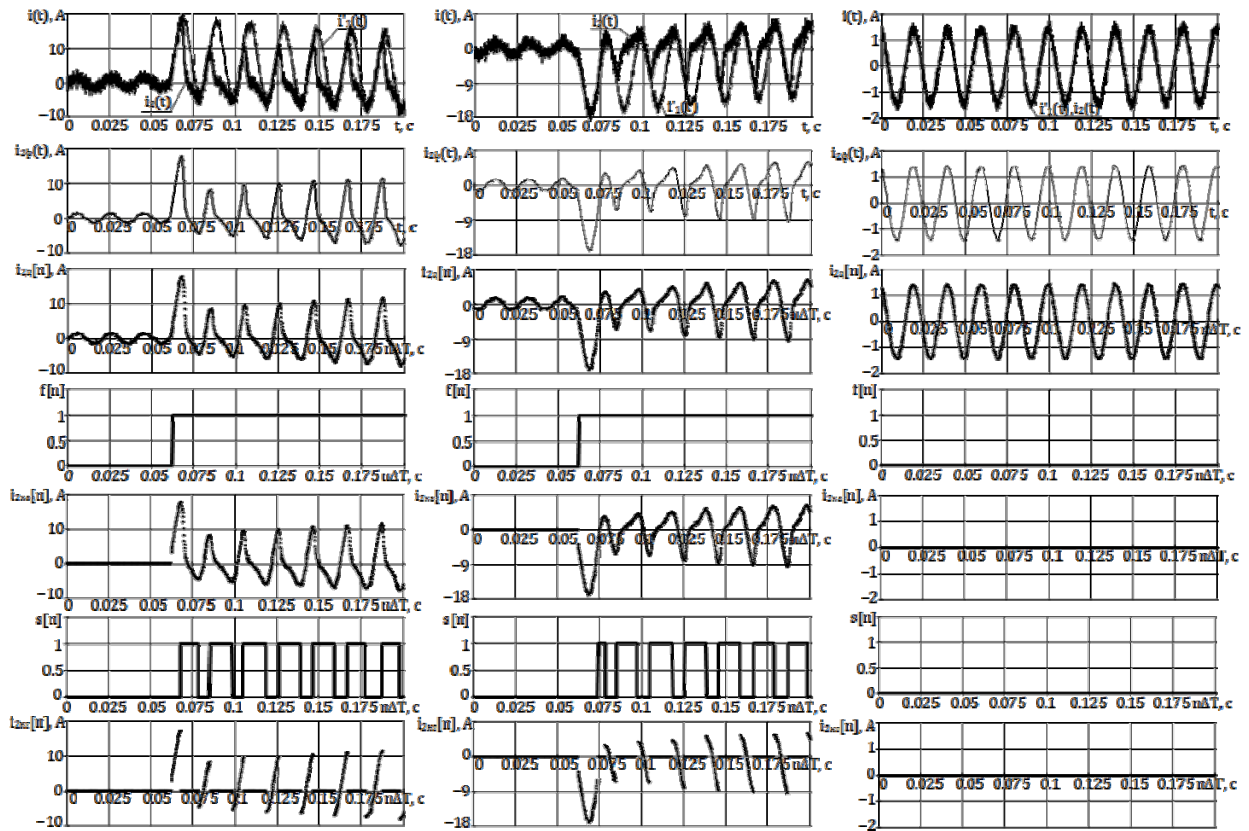


Рис. 4

Число зафіксованих вибірок фази A , що належать періоду $n \in f \dots s$ (рис. 3) становило 37, а фази B – 74. Для пошкоджених фаз формувалося п'ять вікон даних довжиною 7, 11, 15, 19 та 23 вибірок в кожному. Результати розрахунків для кожної з фаз зведено в таблицю.

Фаза	Номер сформованого вікна даних	Довжина вікна даних	Змінні задачі МНК			Параметри періодичної складової струму КЗ	
			x_1	x_2	x_3	I'_{1m}, A	$\varphi_{кз}, ^\circ$
A	1	7	-9.002	5.066	8.266	10.33	29.37
	2	11	-8.917	5.139	8.155	10.292	29.954
	3	15	-8.858	5.199	8.072	10.271	30.409
	4	19	-8.813	5.252	8.005	10.259	30.79
	5	23	-8.774	5.307	7.939	10.254	31.167
B	1	7	-7.602	-4.684	8.099	8.929	211.716
	2	11	-7.588	-4.698	8.084	8.925	211.811
	3	15	-7.578	-4.708	8.069	8.921	211.905
	4	19	-7.567	-4.721	8.012	8.919	212.017
	5	23	-7.556	-4.735	8.004	8.918	212.138

Усереднені значення параметрів періодичної складової, одержані з п'яти вікон даних пошкодженої фази A : $I'_{1m} = 10.281 A$, $\varphi_{кз} = 30.338^\circ$ (похибка визначення 1.13% від заданого під час моделювання); фази B : $I'_{1m} = 8.922 A$, $\varphi_{кз} = 211.917^\circ$ (похибка визначення 0.91% від заданого під час моделювання). Розраховані значення сталих часу фази A становлять $T_1 = 0.126 c$ (похибка розрахунку 16%); фази B $T_1 = 0.192 c$ (похибка розрахунку 28%).

Далі здійснювалася оцінка часу затримки τ для фаз, у яких виявлено насичення, розраховувалися параметри струму КЗ та у відповідності до значень бінарних сигналів $sat[n]$ і відповідно до моделі (3) відбувалася корекція струмів. На рис. 5, а зображено приведені первинні струми $i'_1(t)$ пошкоджених фаз A та B (без врахування ВГ та завод) та відповідні розраховані дискретизовані струми ПВК $i_2[n]$. На рис. 5, б зображено коректовані фазні струми $i_k[n]$ пошкоджених фаз, а на рис. 5, в – розраховано похибки ПВК струму фаз A та B без корекції $\varepsilon_{пвк}[n]$ та з урахуванням корекції $\varepsilon'_{пвк}[n]$.

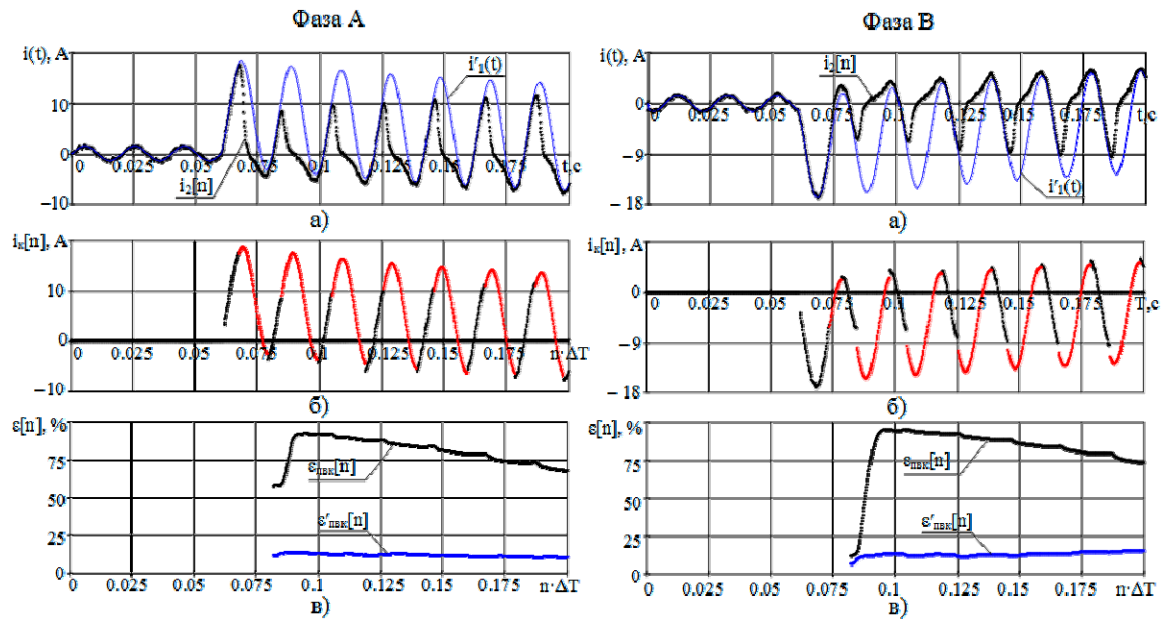


Рис. 5

Повні похибки ПВК $\varepsilon_{\text{пвк}}[n]$ та $\varepsilon'_{\text{пвк}}[n]$ за перехідних режимів визначалися за допомогою рекурсивного представлення для n -ї вибірки формули повної похибки ПВК струму за виразом [46, 47]

$$\varepsilon_{\text{пвк}}[n] = \frac{100}{I_1[n]} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=n-N}^n [k_H * i_2[j] - i_1(t_j)]^2},$$

де $I_1[n]$ – середньоквадратичне значення первинного струму в момент оцінки похибки $\varepsilon_{\text{пвк}}[n]$. Визначення похибок ПВК до та після корекції виконано у відповідності до схеми рис. 6.

Як видно з рис. 6 повні похибки ПВК за умов насичення магнітопроводів фазних ТС досягають 80-95%, по мірі затухання аперіодичної складової первинних струмів фаз та відповідним виходом магнітопроводів фазних ТС зі стану насичення вони зменшуються. Розроблений метод надає можливості зменшити повну похибку ПВК у перехідних режимах за насичення магнітопроводів фазних ТС до значень 6-15%.

Висновки. На основі виконаного аналізу характеристик, переваг та недоліків відомих методів і засобів підвищення точності однофазного ПВК з цифровим виходом, встановлено, що найбільш перспективним задля досягнення поставленої в роботі мети є використання методів цифрової обробки вихідного струму ПВК, в основу якого покладено математичну модель струму КЗ. Реалізація цих методів потребує точного визначення початку входження магнітопроводу ТС у стан насичення, а також надійного і точного розрахунку параметрів моделі струму КЗ, відповідно до якої відбувається корекція спотвореного

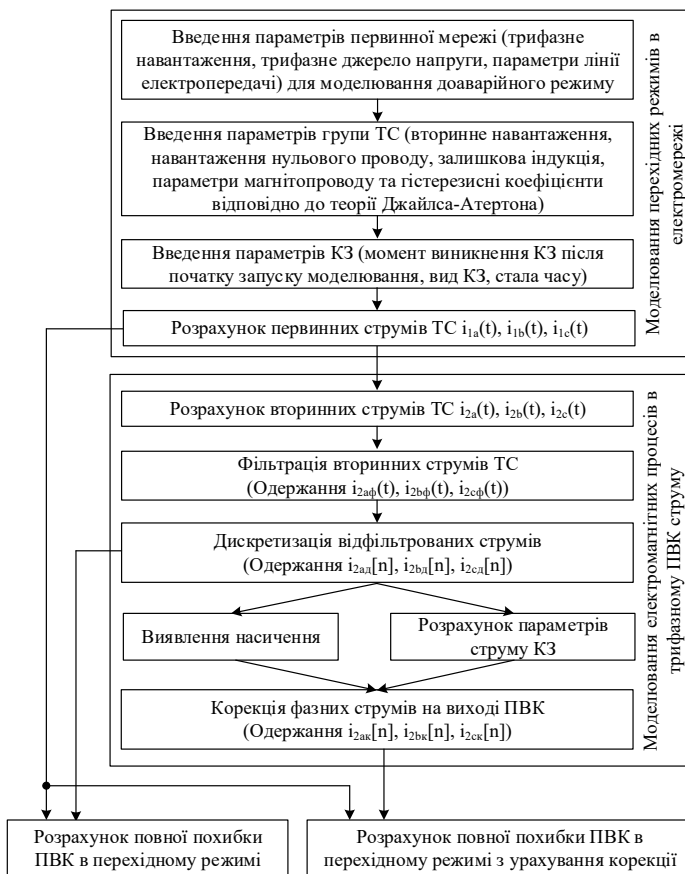


Рис. 6

струму ПВК.

Запропоновано метод мінімізації впливу насичення магнітопроводів ТС на точність ПВК струму, який ґрунтується на моделі струму КЗ, а також розроблених методах виявлення насичення

магнітопроводу ТС, розрахунку параметрів струму КЗ та заміні вибірок струму на виході каналу вибірки, отриманими з моделі струму КЗ, відповідними періодам, де струм є спотвореним.
Роботу виконано за бюджетною темою «Розвиток теорії і методів моніторингу електроенергетичних систем» (шифр «Метеор»), державний реєстраційний номер роботи 0111117U007712, КПКБК 6541030.

1. Tankevych E.M. Primary measuring channels of complex automation systems of electric power objects: Dr. tech. sci. diss.: 05.14.02. Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine. Kyiv. 2004. 445 p. (Ukr)
2. Blinov I.V., Zaitsev I.O., Kuchansky V.V. Problems, methods and means of monitoring power losses in overhead transmission lines. Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series. Springer, 2020. Vol. 298. Pp. 123-136. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8
3. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. IEEE 6th International Conference on *Energy Smart Systems*. Kyiv, Ukraine, April 17-19, 2019. Pp. 339-342. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>
4. Blinov I., Tankevich S. The harmonized role model of electricity market in Ukraine. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems* (IEPS 2016). Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521861>
5. Problems of transient regimes. *Novosti elektrotehniki*. 2015. No 4 (94). P. 8. (Rus.)
6. Souders T. M. Wide-band two stage current transformers of high accuracy. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 1972. Vol. IM-21. No 4. Pp. 340-345.
7. Petersons O. A self-balancing current comparator. *IEEE Transactions on instrument and measurement*. 1966. Vol. 15. No 1-2. Pp. 62-71.
8. Baccigalupi A., Liccardo A. Low-cost prototype for the electronically compensation of current transformers. *IEEE Sensor journal*. 2009. Vol. 9. No 6. Pp. 641-647.
9. Bradley D.A., Gray C.B., O'Kelly D. Transient compensation of current transformers. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*. 1978. Vol. PAS-97. No 4. Pp. 1264-1271.
10. Davarpanah M., Sanaye-Pasand M., Iravani R. A saturation suppression approach for the current transformer. Part I: Fundamental concepts and design. *IEEE Transaction on power delivery*. 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1928-1935.
11. Slomovitz D. Electronic system for increasing the accuracy of in-service instrument-current transformers. *IEEE Transactions on instrument and measurement*. 2003. Vol. 52. No 2. Pp. 408-410.
12. Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K., Johns A.T., Aggarwal R.K. Development and hardware implementation of a compensating algorithm for secondary current of current transformers. *IEE Proceedings on electric power applications*. 1996. Vol. 143. No 1. Pp. 41-49.
13. Kang Y.C., Park J.K., Kang S.H., Johns A.T., Aggarwal R.K. An algorithm for compensating secondary currents of current transformers. *IEEE Transaction on power delivery*. 1997. Vol. 12. No 1. Pp. 116-124.
14. Kang Y.C., Lim U.J., Kang S.H., Kim Y.G. Compensating algorithm for use with measurement type current transformer for protection. *IEE Proceedings on generation, transmission and distribution*. 2005. Vol. 152. No 6. Pp. 880-890.
15. Kang Y.C., Lim U.J., Kang S.H., Crossley P.A. Compensating of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT. *IEEE Transaction on power delivery*. 2004. Vol. 19. No 4. Pp. 1642-1649.
16. Lu Z., Smith J.S., Wu Q.H. Morphological lifting scheme for current transformer saturation detection and compensation. *IEEE Transaction on circuits systems*. 2008. Vol. 55. No 10. Pp. 3349-3357.
17. Ozgonenel O. Correction of saturated current from measurement current transformer. *IET Electrical power application*. 2013. Vol. 7. No 7. Pp. 580-585.
18. Bittanti S., Cuzzola F.A., Lorito F., Poncia G. Compensation of nonlinearities in a current transformer for the reconstruction of the primary current. *IEEE Transaction on control systems technology*. 2001. Vol. 9. No 4. Pp. 565-573.
19. Kang Y.C., Yun J.S., Lee D.E., Kang S.H., Jang S.I., Kim Y.G. Busbar differential protection in conjunction with a current transformer compensating algorithm. *IEEE Transaction on power delivery*. 2008. Vol. 23. No 1. Pp. 100-109.
20. Ajaei F.B., Sanaye-Pasand M., Davarpanah M., Rezaei-Zare A., Iravani R. Compensation of the current transformer saturation effects for digital relays. *IEEE Transaction on power delivery*. 2011. Vol. 26. No 4. Pp. 2531-2540.
21. Chothani N.G., Bhalja B.R. New algorithm for current transformer saturation detection and compensation based on derivatives of secondary current and Newton's backward difference formulae. *IET Generation, transmission and distribution*. 2014. Vol. 8. No 5. Pp. 841-850.
22. El-Naggar K., Gilany M. A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation. *Electric power systems research*. 2007. Vol. 77. No 5-6. Pp. 527-533.
23. Hong Y.Y., Chang-Chian P.C. Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence. *IET generation, transmission and distribution*. 2008. Vol. 2. No 4. Pp. 866-875.
24. Hong Y.Y., Wei D.-W. Compensation of distorted secondary current caused by saturation and remanence in a current transformer. *IEEE Transactions on power delivery*. 2010. Vol. 25. No 1. Pp. 47-54.
25. Ji T.Y., Wu Q.H., Tang W.H., Jiang L. A morphological scheme for the correction of CT saturation waveforms. *IEEE Power and energy society general meeting*. Detroit, USA, July 24-29, 2011. Pp. 1-7.
26. Kgorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs. *IEEE Transactions on power delivery*. 2006. Vol. 21. No 1. Pp. 73-79.
27. Li F., Li Y., Aggarwal R.K. Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. *IEE Processing on generation, transmission and distribution*. 2002. Vol. 149. No 4. Pp. 497-503.

28. Pan J., Vu K., Hu Y. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects. *IEEE Transaction on power delivery*. 2004. Vol. 19. No 4. Pp. 1623-1628.
29. Sachdev M.S., Barlbeau M.A. A new algorithm for digital impedance relays. *IEEE Transaction on power apparatus and systems*. 1979. Vol. PAS-98. No 6. Pp. 2232-2240.
30. Stachel P., Schegner P. Detection and correction of current transformer saturation effects in secondary current signals. *IEEE Power & Energy society general meeting PES'09*. Calgary, AB, 26-30 July, 2009. Pp. 1-6.
31. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performance. *IEEE Transaction on power delivery*. 2008. Vol. 23. No 2. Pp. 624-632.
32. Yu C.-S. Detection and correction of saturated current transformer measurements using decaying DC components. *IEEE Transactions on power delivery*. 2010. Vol. 25. No 3. Pp. 1340-1347.
33. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Yoon H.J. Correction of current transformer distorted secondary current due to saturation using artificial neural networks. *IEEE Transaction on power delivery*. 2001. Vol. 16. No 2. Pp. 189-194.
34. Ohrstom M. Fast fault detection for power distribution systems : PhD thesis : 29.04.2003. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 2003. 104 p.
35. Phadke A.G., Thorp J.S. Computer relaying for power systems. N.-Y.: Wiley, 2009. 326 p.
36. Melo Y.M.P., Lopes F.V., Neves W.L.A., Fernandes Jr.D. A comparison of transmission line fault detection methods. International conference on *power systems transients*. Cavtat, Croatia, June 15-18, 2015. Pp. 1-5.
37. Silva K.M., Souza B.A., Brito N.S.D. Fault detection and classification in transmission lanes based on wavelet transform and ANN. *IEEE Transaction on power delivery*. 2006. Vol. 21. No 4. Pp. 2058-2063.
38. Lin X., Zou L., Tian Q., Weng H., Liu P. A series multiresolution morphological gradient-based criterion to identify CT saturation. *IEEE Transaction on power delivery*. 2006. Vol. 21. No 3. Pp. 1169-1175.
39. Lopes F.V., Fernandes Jr.D., Neves W.L.A. Transients detection in EHV transmission lines using Park's transformation. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*. Orlando, USA, May 7-9, 2012. Pp. 1-6.
40. Noori M. R., Shahrtash S.M. Combinde fault detector and fault phase selector for transmission lines based on adaptive cumulative sum method. *IEEE Transaction on power delivery*. 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1779-1787.
41. Aglar E.U., Tekdemir I.G., Arsoy A.B. Assessment of integral based fault detection methods for power system relaying. 9th International Conference on *Electrical and Electronics Engineering*. Bursa, Turkey, November 26-28, 2015. Pp. 469-473.
42. Gilbert D.M., Morrison I.F. A statistical method for the detection of power system faults. *Electrical Power and Energy Systems*. 1997. Vol. 19. No 4. Pp. 269-275.
43. Noori M.R., Jamali S., Shahrtash S.M. Security assessment for a cumulative sum-based fault detector in transmission lines. 10th International Conference on *Environment and Electrical Engineering*. Rome, Italy, May 8-11, 2011. Pp. 412-417.
44. Raeisi A., Hosseini-Biyouki M.M., Askarian-Abyaneh H., Danyar S. Implementation of a high-speed cumulative determinant-based fault detection algorithm for power system relaying. The 9th *Power system protection and control* conference. Tehran, Iran, January 14-15, 2015. Pp. 64-77.
45. Pankiv V., Tankevych Ye. Online saturation detection of high-voltage current transformers of electric substation three-phase primary measuring channels in power systems transients. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 2. Pp. 63-71. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/teched2019.02.063>
46. IEC 61869-6: 2016 Instrument transformers – Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers. Geneva, IEC, 2016. 176 p.
47. IEC 61869-9: 2016 Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers. Geneva, IEC, 2016. 127 p.

MINIMIZING THE EFFECT OF SATURATION OF HIGH-VOLTAGE CURRENT TRANSFORMERS ON THE ACCURACY OF THREE-PHASE PRIMARY MEASURING CHANNELS WITH DIGITAL OUTPUT

V. Pankiv¹, Ye. Tankevych¹, S. Tankevych²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: tankevichen@ukr.net

²DTEK Grids LLC,

Khokhlovych Family street, 8, LETTER 20D, Kyiv, 004119, Ukraine

The classification is carried out and the characteristics, capabilities and disadvantages of the known methods of programmed correction of the output current of a single-phase primary measuring channel (PMC) of the current are determined. A discretized model of short-circuit current (SCC) is proposed. A method and an algorithm for increasing the accuracy of a three-phase current PMC in transient modes of electric power systems (EPS) under the condition of saturation of the magnetic circuits of its phase current transformers have been developed. The reliability of the developed method is confirmed by simulation of the PMC output current under the condition of phase-to-phase short-circuit of phases A and B without correction and with correction of its phase currents. It is shown that the developed method makes it possible to reduce the total error of the PMC in the transient modes of the EES under the condition of saturation of the magnetic circuits of the CT from 70-90% to 6-15%. References 47, figures 6, table 1.

Key words: measurement channel, digital output, current transformer, saturation, signal, digital processing, method, accuracy.

Надійшла 16.11.2020

Остаточний варіант 16.09.2021