

ВИЯВЛЕННЯ В ОНЛАЙН РЕЖИМІ НАСИЧЕННЯ МАГНІТОПРОВІДІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ТРИФАЗНИХ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

В.І. Паньків, Є.М. Танкевич*, докт.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

Визначено характеристики відомих методів виявлення насичення магнітопроводів трансформаторів струму (ТС), поняття показника насичення та його порогового значення. Подано опис математичної моделі (ММ) трифазного первинного вимірювального каналу (ПВК) струму, що складається з моделі групи фазних ТС, кожен з яких представлений ММ, побудованою на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона і програмного забезпечення цифрової обробки та аналізу сигналів ПВК. З використанням розроблених моделі ПВК і програмного середовища реалізовано ряд відомих методів виявлення насичення, встановлено їхні основні характеристики, переваги та недоліки. Розроблено точний і завадостійкий метод онлайн виявлення насичення магнітопроводів ТС у складі ПВК струму в режимі короткого замикання (КЗ) в електричній мережі. Характеристики методу підтверджено експериментально. Бібл. 31, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: коротке замикання, трансформатор струму, насичення, дискретне перетворення Фур'є, метод.

Вступ. Левова частка необхідної інформації про стан електричного обладнання та режими високовольтних електроенергетичних систем (ЕЕС) отримується за допомогою процедур вимірювання та моніторингу, де невід'ємною складовою є обробка сигналів струму та напруги. Сигнали та (або) певна часткова інформація про них, що надходять до кінцевого споживача, на своєму шляху піддаються ряду змін і перетворень у ПВК струму чи напруги [1]. Невід'ємною і найважливішою складовою ПВК, з точки зору забезпечення точності вимірювань струмів, є ТС. Відомо, що в перехідних режимах роботи, особливо за появи у високовольтних мережах струму КЗ, у випадках, коли збережена залишкова індукція в магнітопроводах ТС та полярність аперіодичної складової струму КЗ одного знаку, може статися швидке насичення магнітопроводу ТС. Це призводить до спотворення вихідних сигналів ПВК і може стати причиною неправильного або неякісного функціонування релейного захисту ЕЕС: максимального струмового [2–7], дистанційного [2–4], диференціального [8–11], а також систем моніторингу технічного стану їхнього електричного обладнання [12], а це, в свою чергу, до несвоєчасного виведення з експлуатації обладнання для його заміни чи аварій в ЕЕС та значних економічних втрат.

Отримувати достовірну інформацію про струми КЗ і таким чином запобігати ймовірним помилковим діям релейного захисту можливо здійснюючи корекцію струму КЗ на періоді насичення магнітопроводу ТС, що потребує попереднього розв'язання задачі виявлення моменту появи насичення та визначення його тривалості. Отже **метою даної роботи** є оцінювання характеристик відомих методів виявлення насичення магнітних осердь ТС за умов КЗ в ЕЕС, розробка точного та завадостійкого методу і відповідного йому алгоритму виявлення в онлайн режимі насичення магнітопроводів ТС у складі трифазних ПВК струму в перехідних режимах ЕЕС.

Основні положення дослідження методів виявлення насичення магнітопроводів ТС. Для дослідження існуючих методів виявлення насичення магнітопроводів ТС використано модель трифазного ПВК струму (рис. 1). До її складу входить модель групи фазних ТС (блок 1), яка реалізована в програмному середовищі Matlab Simulink [13], і програмне забезпечення цифрової обробки та аналізу сигналів ПВК, збереження результатів аналізу в базі даних та їх візуалізації (блок 2). Для моделювання ТС у групі використано математичну модель, розроблену на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона [14]. Передача результатів моделювання перехідних процесів у групі ТС від програмного середовища блока 1 до програмного середовища блока 2 відбувається через генерування в блоці 1 файлів зі структурою даних CSV (comma separated value) і зчитуванням та обробкою цих даних у блоці 2.

Дослідження методів виконувалося за таких параметрів блоків 1 та 2: до складу групи входять три фазних ТС типу ТФКН-330 з номінальними параметрами: первинний струм $I_{1н} = 2000$ А; вторинний струм $I_{2н} = 1$ А; кількість витків первинної обмотки $w_1 = 1$; кількість витків вторинної обмот-

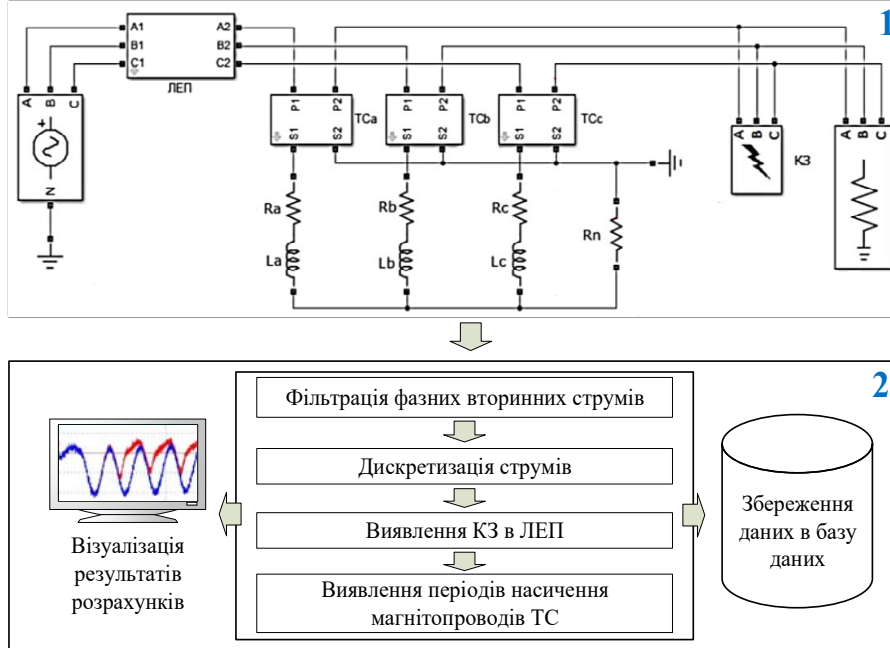


Рис. 1

ки $w_2 = 1995$; середня довжина лінії магнітного потоку $l_c = 0,957$ м; площа поперечного перерізу магнітопроводу $S = 15,3 \cdot 10^{-4}$ м²; опір вторинної обмотки $Z_{2обм} \approx R_{2обм} = 8,2$ Ом; опір навантаження на обмотку захисту класу точності 10Р $Z_{2н} = 40$ Ом з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_{2н} = 0.8$. Магнітопровід виконано зі сталі марки 1511 (Э41). Довжина контрольного кабелю типу КВВГ 7×2.5 (ліній зв'язку) становить 625 м, відповідно розрахований опір нульового проводу – 4.375 Ом. Як модель аналогового фільтра використано

модель цифрового фільтра Баттерворса четвертого порядку з кутвою частотою зрізу 400 Гц. Частота дискретизації струмів моделлю АЦП становила 6400 Гц ($N = 128$ вибірок/період).

Дослідження виконувалося для випадку однофазного КЗ на землю фази C у кінці лінії електропередачі поблизу навантаження. Момент виникнення КЗ в фазі C $\varphi_{1A} = 120^\circ$, стала часу первинного кола при пошкодженні $T_1 = 0.1$ с, діюче значення періодичної складової основної частоти струму КЗ $I_{1C} = 8000$ А, діюче значення струму доаварійного режиму в усіх трьох фазах $I_1 = 2000$ А (номінальний струм). З метою максимального наближення до реальних умов на фазні миттєві струми додатково накладалися завади у вигляді білого Гаусового шуму з показником відношення сигналу до шуму (signal to noise ratio, SNR), що дорівнює 15 Дб.

На рис. 2 показано зашумлені приведені первинний $i'_1(t)$ та вторинний $i_2(t)$ струми ТС пошкодженої фази C , відфільтрований $i_{2\phi}(t)$ та дискретизований вторинний струм ТС $i_2[n]$, який поступав на вхід реалізованих авторами цієї роботи алгоритмів методів, характеристики яких досліджувалися.

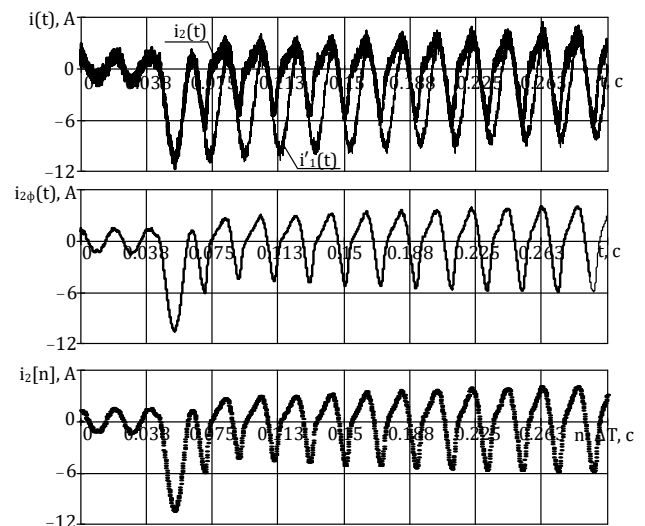


Рис. 2

Аналіз властивостей методів виявлення насичення магнітопроводів ТС. Аналіз публікацій [3, 4, 8, 15–30] засвідчив наявність значної кількості методів виявлення періодів насичення магнітопроводів ТС. Насамперед зазначимо, що усі вони передбачають визначення наступних величин: індексу насичення (ІН) – математичної або фізичної величини, яка розраховується відповідно до задіяного в методі математичного апарату; одного чи двох порогових значень $th[n]$ (threshold) ІН, що є межами між ненасиченим і насиченим станами магнітопроводу і вказують на початок насичення і вихід

із цього стану; показника насичення $sat[n]$ – значення бінарного сигналу, що є результатом порівняння плинного значення ІН з його пороговим значенням і характеризує плинний магнітний стан магнітопроводу. Розрахунки $sat[n]$ і $th[n]$ кожним методом потребують отримання певної кількості вибірок вторинного струму $i_2[n]$ ТС і виконання певної кількості обчислювальних операцій з вікном даних кожної його нової вибірки, що надходить. Тому довжина вікна даних і кількість обчислювальних операцій з ним, необхідних для розрахунку показника насичення і його порогових значень, поряд з точністю та завадостійкістю, прийняті як основні характеристики методів при їхньому порівнянні та встановленні здатності забезпечити точне і ефективне визначення наявності та тривалості насичення. В залежності від підходів, покладених в основу методів, їх доцільно умовно поділити на декілька груп. Так, до першої групи належать методи, що передбачають розробку і застосування цифрової фільтрації і дискретних перетворень Фур'є. Серед них є методи, які використовують для розрахунку ІН наступні функції: функцію $\Delta_1[n]$ різниці Ньютона зі зворотнім зв'язком [19]; функцію $\Delta_2[n]$ різниці другого порядку [24, 25, 29, 30]; функцію $\Delta_3[n]$ різниці третього порядку [23];

функцію $\Delta_{lan}[n]$ різниці низько-шумового фільтра Ланзоса [15], а також метод, орієнтований на аналіз наявності аперіодичної складової у вторинному струмі ТС під час КЗ [18]. На рис. 3 показано результати розрахунків ІН і його порогових значень за вказаними методами для описаного раніше випадку КЗ фази С. З цих розрахунків з'ясувалося, що вони потребують порівняно невеликої кількості вибірок струму $i_2[n]$ і обчислювальних операцій на кожне вікно даних, що є їхньою перевагою. Як видно з рис. 3, в усіх трьох кривих $\Delta[n]$, $\Delta_2[n]$ і $\Delta_3[n]$ існують пікові значення, які перевищують їхні порогові значення $th[n]$ та співпадають із початками періодів входження осердь ТС у стан насичення. Проте в усіх цих трьох кривих також мають місце помилкові пульсації, які перевищують значення $th[n]$ і ніяк не пов'язані з початками чи кінцями періодів насичення, а є наслідком завад у струмі КЗ. Реалізація п'ятого з розглянутих методів цієї групи – методу аналізу аперіодичної складової струму КЗ – показала, що періоди перевищення порогових значень ІН, що використовуються в ньому, не корелюються з періодами насичення і мають місце не лише під час КЗ, а й у доаварійному режимі.

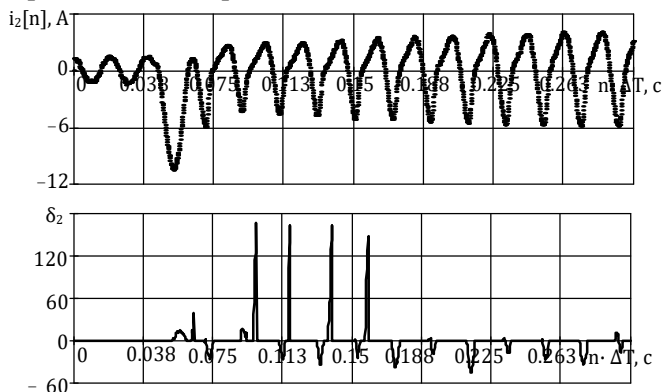


Рис. 4

До третьої групи належать методи, які ґрунтуються на аналізі симетрії перехідного вторинного струму ТС під час КЗ відносно його локальних пікових значень [21, 28]. На рис. 4 показано результа-

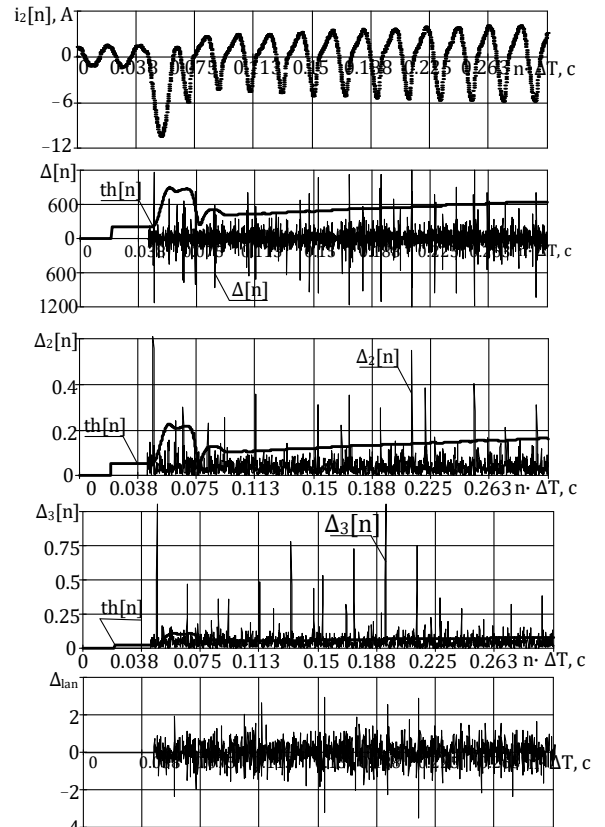


Рис. 3

Другу групу складають методи, що базуються на використанні похідних вторинного струму ТС різних порядків для прогнозування кожної наступної вибірки та її порівнянні з фактичним значенням цього струму [16]. Якщо значення плинної фактичної вибірки струму, яка в цих методах вважається ІН, перевищує значення прогнозованої вибірки, що прийнята за порогове значення ІН, то фіксується початок періоду насичення магнітопроводу. Ці методи, порівняно з іншими, потребують мінімальної довжини вікна даних та мінімальної кількості обчислювальних операцій.

ти експериментального визначення ІН шляхом порівняння значення функції різниці другого порядку на однаковому інтервалі з обох боків відносно локальних екстремумів струму за методом, запропонованим у [21]. Алгоритм методу за [28] полягає у накопиченні з моменту фіксації переходу вторинного струму $i_2[n]$ через нуль вибірок, які належать половині періоду основної частоти, визначенні локального екстремуму струму $i_2(t_m)$ на цьому півперіоді; формуванні відносно моменту часу t_m двох підмасивів вибірок і з застосуванням методу найменших квадратів (МНК) оцінюванні прогнозованих значень вибірок $i_{2e}(t_1)$ та $i_{2e}(t_2)$ у моменти часу t_1 та t_2 поза досліджуваним вікном даних; розрахунку ІН δ_e і його порівнянні з пороговим значенням th . Через неповноту поданого опису обох цих методів (відсутність моделі порогового значення ІН) і моделі струму, яку використано як шаблон МНК (у другому методі) оцінити їхні характеристики неможливо.

Основні характеристики розглянутих вище методів подано в таблиці.

Теоретична основа методу	Модель		Довжина вікна даних	Кількість обчислювальних операцій
	Індексу насичення	Порогового значення індексу насичення		
Аналіз затухаючої аперіодичної складової [18]	$\gamma[n] = \frac{p[n] \cdot \dot{I}[n] + \dot{I}[n] - \dot{I}[n-1] }{p[n] \cdot \dot{I}[n] + \dot{I}[n-1] - \dot{I}[n-2] },$ $p[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \dot{I}[n]/D[n] > 10, \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$ $D[n] = \left \frac{\dot{I}[n] - \dot{I}[n-1]}{1 - 1/(\exp(-j2\pi n/N))} \right ,$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } th_{upper} > \gamma[n] > th_{lower}, \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th_{upper} = 0.85$ $th_{lower} = 1.05$	$N + 3$	$N^2 + 4$
Визначення функції різниці низькошумового фільтра Ланзоса [15]	$\Delta_{lan}[n] = i_2[n] - 9 \cdot i_2[n-1] + 8 \cdot i_2[n-2] + 8 \cdot i_2[n-3] - 9 \cdot i_2[n-4] + i_2[n-5],$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta_{lan}[n] > th[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th = 0.0118 \cdot k \cdot I_m$	**	**
Визначення симетрії вікна даних на основі функції різниці другого порядку [21]	$\delta_2[n_m + n] = \left(\frac{\Delta_2[n_m + n] - \Delta_2[n_m - n]}{i_2[k_m]} \right) \cdot 100,$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } th_{upper} > \delta_2[n] > th_{lower}, \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	th_{upper} th_{lower}	**	**
Прогнозування вибірки вторинного струму на основі першої похідної вторинного струму [16]	$sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } th[n] > i_2[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = 2 \cdot i_2[n] - i_2[n-1]$	2	3
Прогнозування вибірки вторинного струму на основі другої похідної вторинного струму [16]	$sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } th[n] > i_2[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = 3 \cdot i_2[n] - 3 \cdot i_2[n-1] + i_2[n-2]$	3	4
Прогнозування вибірки вторинного струму на основі третьої похідної вторинного струму [16]	$sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } th[n] > i_2[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = 4 \cdot i_2[n] - 6 \cdot i_2[n-1] + 4 \cdot i_2[n-2] - i_2[n-3]$	4	5
Визначення функції різниці другого порядку [29, 24, 30, 25]	$\Delta_2[n] = i_2[n] - 2 \cdot i_2[n-1] + i_2[n-2],$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta_2[n] > th[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = k \cdot \sqrt{2} \cdot I[n] \cdot \left[2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]$	N	$N^2 + 10$
Визначення функції різниці третього порядку [23]	$\Delta_3[n] = i_2[n] - 3 \cdot i_2[n-1] + 3 \cdot i_2[n-2] - i_2[n-3],$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta_3[n] > th[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = k \cdot \sqrt{2} \cdot I[n] \cdot \left[2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]$	N	$N^2 + 13$
Визначення функції різниці Ньютона зі зворотнім зв'язком [19]	$\Delta[n] = \frac{1}{\Delta T} (0.25 \cdot i_2[n] - i_2[n-1] + 1.5 \cdot i_2[n-2] - i_2[n-3] + 0.25 \cdot i_2[n-4]),$ $sat[n] = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \Delta[n] > th[n], \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$	$th[n] = k \cdot \sqrt{2} \cdot I[n] \cdot \left[2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]$	N	$N^2 + 17$

** – не вдалось оцінити через відсутність деякої інформації безпосередньо в літературі.

У таблиці: $i_2[n]$ – дискретизований вторинний струм ПВК; n – індекс вибірки вторинного струму; N – кількість вибірок за період основної частоти, що залежить від частоти дискретизації АЦП; $sat[n]$ – бінарний сигнал (1 – насичення відбулось, 0 – насичення відсутнє); $th[n]$ – порогове значення індексу насичення; k – коефіцієнт запасу порогового значення.

Четверта група представлена методами, які використовують, з одного боку, два достатньо різні, проте, з іншого боку, дещо схожі інструменти цифрової обробки сигналів: теорію математичної морфології (обробка суто в часовому просторі) [8, 20, 27] та вейвлет перетворення (обробка сигналу в часовому та частотному просторах) [3, 22, 26]. У працях [20, 27] ІН визначається шляхом обробки вторинного струму ТС та розроблених авторами елементів його структурування операторами звуження та розширення. У [8] запропоновано використовувати два елементи структурування – один для зростаючої півхвилі вторинного струму ТС, інший – до спадаючої його півхвилі. Їхня форма має вигляд масштабуючої плоскої лінії з різною полярністю. До кожної півхвилі вторинного струму застосовується розроблений морфологічний градієнт з відповідним елементом структурування, який і є ІН та представляє собою звичайну різницю між базовими операторами розширення та звуження. В усіх цих працях відсутня будь-яка інформація щодо розрахунку порогового значення ІН.

Застосування дискретних вейвлет перетворень (ДВП) для виявлення періодів насичення магнітопроводів ТС приваблює можливістю дослідження вторинного струму ТС, як зазначено вище, у двох просторах. Базисною операцією такого перетворення є згортка досліджуваного струму та обраного вейвлету, а його результатом – два набори коефіцієнтів: деталізації та апроксимації. У [3, 22, 26] як вейвлет функцію використано вейвлет Добеші четвертого порядку, а плинні значення ІН тотожні коефіцієнтам деталізації, отримуваним на першому етапі розкладу дискретних вейвлет перетворень.

Швидкість виявлення періодів насичення магнітопроводів ТС за алгоритмами методів цієї групи залежить від довжини вікна даних та кількості обчислювальних операцій, необхідних для розрахунку ІН, які в свою чергу, є залежними від довжини обраних елемента структурування та вейвлет функції. Зазначимо також, що використовувані в цих методах ІН є безрозмірними математичними величинами, характер зміни яких за різних режимів роботи ТС (видів КЗ) за наявності в струмі КЗ вищих гармонік і завад, не досліджено, що не дає змогу чітко визначити їхні порогові значення, що, у зазначених працях і не зроблено.

Окрему, п'яту групу складають методи, які передбачають застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) для виявлення насичення магнітопроводів ТС [4, 17, 22]. Реалізація цих методів полягає у проектуванні самої мережі, тобто у виборі структури, кількості шарів та нейронів у кожному шарі мережі, функції активації нейронів і т.п., а також її навчання. Навіть після виконання усіх цих процедур для виявлення періодів насичення потрібна значна кількість обчислювальних операцій, що є одним із недоліків цих методів. Здатність ШНМ після навчання точно фіксувати періоди насичення магнітопроводу суттєво залежить від точності математичних моделей ТС, що використовуються, і точності визначення їхніх вхідних параметрів (параметрів самого ТС), що обмежує узагальнене використання ШНМ для різних типів ТС.

Отже, актуальність розв'язання задачі забезпечення надійного функціонування систем релейного захисту і моніторингу електричного обладнання енергосистем, а також одержані результати проведеного дослідження характеристик і можливостей відомих методів щодо забезпечення точного визначення періодів насичення магнітопроводів ТС (низька точність, чутливість до завад, недостатність обґрунтування, незавершеність, потреба у вдосконаленні та ін.) спонукали авторів даного рукопису до розробки нового методу.

Метод виявлення насичення магнітопроводу ТС на основі аналізу частотного вмісту його вторинного струму на перших періодах КЗ у ЕЕС. В основу методу покладено результати дослідження спектральних характеристик ПВК струму [31], де зокрема встановлено, що початок насичення магнітопроводу високовольтного ТС у складі ПВК супроводжується різким перерозподілом потужності струму між гармоніками вторинного струму ТС і значною відмінністю спектральних щільностей $s_0[n]$ амплітуд аперіодичної складової та другої гармоніки $s_2[n]$ приведенного первинного та вторинного струмів ТС.

Метод полягає у наступному: насамперед виконується постійне обчислення двох ІН: спектральної щільності амплітуд нульової $s_0[n]$ та другої гармонік $s_2[n]$ вторинного струму ТС. На початку кожного нового періоду після старту алгоритму, з урахуванням значень ІН за попередній повний пе-

ріод основної частоти ($n \in n - N \dots n$), відбувається розрахунок порогових значень th_0 та th_2 обох ІН, як двократне максимальне значення щільності амплітуд нульової гармоніки $s_0[n]$ для th_0 та трикратне максимальне значення щільності амплітуд другої гармоніки $s_2[n]$ для th_2 :

$$th_0 = 2 \cdot \max(s_0[n]), \text{ де } n \in n - N \dots n; \quad th_2 = 3 \cdot \max(s_2[n]), \text{ де } n \in n - N \dots n.$$

Значення коефіцієнтів 2 та 3 у цих виразах вибрані такими, щоб забезпечити надійність методу за умов незначних збурень в ЕЕС, таких, як раптовий приріст чи спад навантаження в неаварійному режимі. Як показано у [31], з появою насичення магнітопроводу ТС значення ІН $s_0[n]$ і $s_2[n]$ відразу зростають у порівнянні з їхніми максимальними значеннями в останньому періоді доаварійного режиму відповідно у 4–8 та 7–15 разів (залежно від параметрів струму КЗ), що стало основою вибору значень цих коефіцієнтів.

Алгоритм методу передбачає існування детектора КЗ (алгоритму реалізації певного методу виявлення КЗ), який фіксує індекс вибірки $f = n$ вторинного струму $i_2[n]$, відповідної початку КЗ. Як базис детектора КЗ використано появу різкого перерозподілу потужності вторинного струму ТС між його гармоніками в перші декілька вибірок після появи КЗ. Це дає змогу достатньо швидко і точно, з мінімальними обчислювальними затратами визначити індекс вибірки f початку КЗ. Фіксація цього перерозподілу здійснюється з використанням тих самих індексів $s_0[n]$ та $s_2[n]$ та їхніх порогових значень th_0 та th_2 .

У разі виконання умови $s_0[n] > th_0$ та $s_2[n] > th_2$, що засвідчує наявність КЗ, фіксується відповідне значення номера вибірки $f = n$ вторинного струму $i_2[n]$, встановлюється полярність струму та визначається номер контрольної вибірки $m = f + N$, де N – кількість вибірок за період основної частоти. Оскільки у перший період після виникнення КЗ у вікно даних ДПФ потрапляють вибірки обох режимів – доаварійного та аварійного і відбувається різкий перерозподіл потужності струму між його гармоніками, встановити чи відбулося насичення магнітопроводу ТС у цей період ($n \in f \dots m$) практично неможливо. При надходженні вибірки m вікно даних ДПФ вже складається лише з вибірок струму аварійного режиму, що дає змогу чітко встановити, чи відбулося насичення у перший період після КЗ (тобто у період $n \in f \dots m$). При цьому порогові значення ІН th_0 та th_2 більше не перераховуються.

У випадку фіксації КЗ і встановлення в момент контрольної вибірки струму m відсутності насичення магнітопроводу ТС на першому періоді основної частоти після виникнення КЗ здійснюється подальший аналіз вибірок вторинного струму $i_2[n]$. Показником наявності та фіксації насичення на наступних 2-му, 3-му та ін. періодах є перевищення номером поточної вибірки n вторинного струму $i_2[n]$ номера контрольної вибірки m (яка була розрахована в момент фіксації КЗ) та різке зростання спектральної щільності амплітуд другої гармоніки $s_2[n]$, значення якої перевищує відповідне порогове значення th_2 .

Якщо насичення магнітопроводу ТС зафіксовано, то визначається номер вибірки, відповідної початку першого періоду насичення як $\max(i_2[n])$ для позитивної полярності та $\min(i_2[n])$, де $n \in f \dots m$ – для негативної полярності аперіодичної складової струму КЗ.

Незалежно від того, у якому саме періоді основної частоти після виникнення КЗ сталося насичення, кожна нова вибірка n вторинного струму $i_2[n]$ підпадає під аналіз з метою визначення потенційного кінця періоду насичення магнітопроводу ТС. Критерієм закінчення періоду насичення магнітопроводу ТС є досягнення локального мінімуму вторинного струму $\min(i_2[n])$, $n \in s \dots s + N$ для випадку позитивної полярності аперіодичної складової струму КЗ (ця характеристика фіксується в момент виявлення КЗ) та локального максимуму вторинного струму $\max(i_2[n])$, де $n \in s \dots s + N$ – для випадку негативної полярності аперіодичної складової струму КЗ.

На рис. 5 показано результати експериментальної перевірки методу для випадку міжфазного КЗ фаз A і B з наступними параметрами. Доаварійний режим: магнітопроводи ТС фаз B та C – розмагнічені (залишкова індукція відсутня), в магнітопроводі ТС фази A значення залишкової індукції $B_{rA} = 0.6$ Тл. Аварійний режим: момент виникнення КЗ у фазі A $\varphi_{1A} = 0^\circ$, у фазі B $\varphi_{1B} = -120^\circ$; зна-

чення періодичних складових струму КЗ у фазі A складає $I_{1A} = 7900$ А, у фазі B – $I_{1B} = 5970$ А, стала часу первинного кола $T_1 = 0.3$ с.

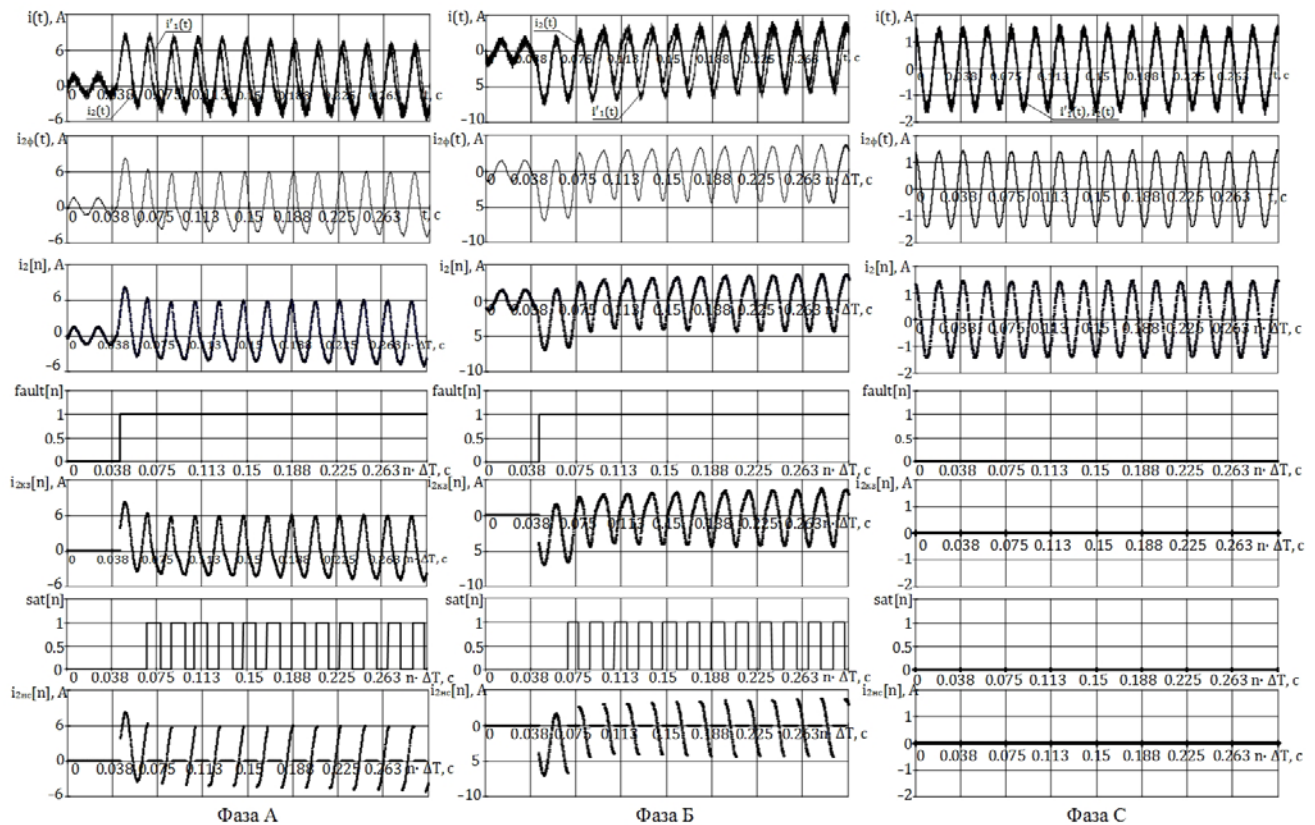


Рис. 5

Як видно з рис. 5, у результаті обробки вибірок вторинних струмів $i_2[n]$ ТС усіх фаз розробленим методом безпомилково визначено періоди насичення магнітопроводів ТС фаз A і B та виділено вибірки вторинного струму $i_{2nc}[n]$, що належать цим періодам.

Висновки. У результаті виконаних теоретичного аналізу і експериментального дослідження ряду відомих методів виявлення насичення магнітних осердь ТС у складі ПВК струму (методу аналізу затухаючої аперіодичної складової струму КЗ, функції різниці Ньютона зі зворотнім зв'язком, функції різниці другого порядку, функції різниці третього порядку, функції різниці низько-шумового фільтра Ланзоса) встановлено їхню практичну нездатність забезпечити необхідні характеристики точності, швидкості та завадостійкості, особливо за умов наявності у струмі КЗ завад, характерних для високовольтних електричних підстанцій ЕЕС. Це унеможливило їхнє практичне використання у складі математичного забезпечення сучасних систем вимірювання, моніторингу, релейного захисту та керування ЕЕС.

Встановлено, що використання (з метою виявлення насичення) методів цифрової обробки сигналів, що ґрунтуються на теорії математичної морфології та вейвлет перетворень, через складність і недостатнє їхнє обґрунтування поки що не виправдано, а самі методи потребують подальшого розвитку та вдосконалення.

Показано, що потреба у значній кількості обчислювальних операцій і висока чутливість до точності математичної моделі ТС обмежує універсальне використання штучних нейронних мереж для фіксації періодів насичення магнітних осердь ТС.

Розроблено метод і алгоритм онлайн визначення періодів насичення магнітопроводів фазних ТС у складі трифазного ПВК струму, що ґрунтуються на використанні точної математичної моделі перехідних електромагнітних процесів у ПВК за умов КЗ в ЕЕС, певного методу виявлення КЗ, обробки вихідних фазних струмів ПВК методом ДПФ, використанні як ІН спектральних щільностей амплітуд аперіодичної складової $s_0[n]$ та другої гармоніки $s_2[n]$ вторинних струмів ТС, їхньому аналізу та порівнянні на перших періодах після виникнення КЗ. Метод характеризується високою точністю, швидкістю та завадостійкістю, меншою в порівнянні з більшістю відомих методів кількістю обчис-

ловальних операцій та складає основу розробки методу корекції вихідних струмів ПВК у режимі КЗ за умов насичення осердь ТС, що є важливою актуальною задачею для систем автоматизації ЕЕС.

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 NAN of Ukraine. Kyiv. 2004. 445 p. (Ukr)
2. 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.
3. 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.
4. Rebizant W., Daniel B. Current transformer saturation detection with genetically optimized neural networks. *IEEE Transaction on power delivery*. 2007. Vol. 22. No 2. Pp. 820-827.
5. Al-Abbas N. H. Efficient proposed solutions for current transformers saturation effects on overcurrent relays operations in distribution systems. Proceedings of the 44th International Universities *power engineering conference*. Great Britain, Glasgow, 1-4 September 2009. Pp. 1-6.
6. El-Amin I.M., Al-Abbas N.H. Saturation of current transformers and its impact on digital overcurrent relays. IEEE/PES Transition and distribution conference and exposition. Latin America, Caracas, 15-18 August 2006. Pp. 1-6.
7. Terrence S., Hunt R. Current transformer saturation effects on coordinating time interval. Conference record of 2012 annual IEEE Pulp and paper industry technical conference. USA, Portland, 17-21 June 2012. Pp. 1-7.
8. 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.
9. Villamagna N., Crossley P.A. A CT saturation detection algorithm using symmetrical components for current differential protection. *IEEE Transaction on power delivery*. 2006. Vol. 21. No 1. Pp. 38-45.
10. 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. 2. No 1. Pp. 100-109.
11. Davarpanah M., Sanaye-Pasand M., Irvani R. Performance enhancement of the transformer restricted earth fault relay. *IEEE Transaction on power delivery*. 2013. Vol. 28. No 1. Pp. 467-474.
12. Stognii B.S., Sopol M.F., Tretiakova L.D., Tankevych E.M., Panov A.V., Pankiv V.I. Evaluation of high-voltage circuit breaker interruption resource. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No. 1. Pp. 71-80. (Ukr)
13. Stognii B.S., Sopol M.F., Pankiv V.I., Tankevych E.M. Modeling of electromagnetic processes in groups of high-voltage current transformers. *Visnyk Vinnytskoho Politeknichnoho Instytutu*. 2016. No1. Pp. 91-95. (Ukr)
14. Stognii B.S., Sopol M.F., Pankiv V.I., Tankevych E.M. Current transformer mathematical model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 58-65. (Ukr)
15. Schettino B.M., Duque C.A., Silveire P.M., Ribeiro P.F., Cerque A.S. A new method of current transformer saturation detection in the presence of noise. *IEEE Transaction on power delivery*. 2014. Vol. 29. No 4. Pp. 1760-1767.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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, MI, USA, 24-29 July 2011. Pp. 1-7.
21. Hooshyar A., Sanaye-Pasand M., Davarpanah M. Development of a new derivative-based algorithm to detect current transformer saturation. *IET Generation, transmission and distribution*. 2012. Vol. 6. No 3. Pp. 207-217.
22. 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.
23. Kang Y.C., Ok S.H., Kang S.H., Crossley P.A. Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation. *IEE Processing generation, transmission and distribution*. 2004. Vol. 151. No 1. Pp. 27-35.
24. Dashti H. Sanaye-Pasand M., Davarpanah M. Current transformer saturation detectors for busbar differential protection. 42nd International Universities Power Engineering Conference. Brighton, U.K. 2007. Pp. 338-343.
25. Kang Y.C. Kang S.H., Crossley P. An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third difference function. IEEE Bologna Powertech conference proceedings. Bologna, Italy, 23-26 June 2003. Pp. 320-325.
26. Li F., Li Y., Aggarwal R. K. Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. *IEE Processing generation, transmission and distribution*. 2002. Vol. 149. No 4. Pp. 497-503.
27. 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. (Eng)

28. Hooshyar A., Sanaye-Pasand M. CT saturation detection based on waveform analysis using a variable-length window. *IEEE Transaction on power delivery*. 2011. Vol. 26. No 3. Pp. 2040–2050.

29. Dashti H., Sanaye-Pasand M., Davarpanah M. Fast and reliable CT saturation detection using a combined method. *IEEE Transaction on power delivery*. 2009. Vol. 24. No 3. Pp. 1037–1044.

30. Kang Y.C., Ok S.H., Kang S.H. A CT saturation detection algorithm. *IEEE Transaction on power delivery*. 2004. Vol. 19. No 1. Pp. 78-85.

31. Pankiv V.I. Tankevych E.M. Spectral analysis of the primary measuring channels of high-voltage power system substations. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. Vol. 51. Pp. 13-20. (Ukr)

УДК 621.314.222.68

ОБНАРУЖЕНИЕ В ОНЛАЙН РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДОВ ВЫСОКО-ВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ТРЕХФАЗНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В.И. Паньків, Е.Н. Танкевич, докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

Определены характеристики известных методов выявления насыщения магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ), понятие показателя насыщения и его порогового значения. Дано описание математической модели (ММ) трехфазного первичного измерительного канала (ПИК) тока, который состоит из модели группы фазных ТС, каждый из которых представлен ММ, построенной на основе теории ферромагнитного гистерезиса Джэйлса-Атертона и программного обеспечения цифровой обработки и анализа сигналов ПИК. С использованием разработанных модели ПИК и программной среды осуществлена реализация ряда известных методов выявления насыщения, установлены их основные характеристики, преимущества и недостатки. Разработан точный и помехоустойчивый метод онлайн выявления насыщения магнитопроводов ТТ в составе ПИК в режиме КЗ в электроэнергетических системах. Характеристики метода подтверждены экспериментально. Библ. 31, рис. 5., табл. 1.

Ключевые слова: короткое замыкание, трансформатор тока, насыщение, дискретное преобразование Фурье, метод.

ONLINE SATURATION DETECTION OF HIGH-VOLTAGE CURRENT TRANSFORMERS OF ELECTRIC SUBSTATION THREE-PHASE PRIMARY MEASURING CHANNELS IN POWER SYSTEMS TRANSIENTS

V.I. Pankiv, E.M. Tankevych

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

The saturation index, its threshold value and characteristics of known current transformer (CT) saturation detection methods are determined. A description of the mathematical model (MM) of the three-phase primary measuring channel (PMC) of current, which consists of a model of the group of CT, each of which is represented by a MM based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis for digital analysis and signals processing is depicted. Using the developed MM of the three-phase PMC and the software environment, a number of known methods of saturation detection have been implemented, and their main features, characteristics, advantages and disadvantages have been established. The noise-immune and precise method of online CT saturation detection, which are the part of the three-phase PMC under the fault condition of power system has been developed. Characteristics of the method are confirmed experimentally. References 31, figures 5, table 1.

Key words: fault current, current transformer, saturation, discrete Fourier transform, method.

Надійшла 26.09.2018
Остаточний варіант 05.02.2019