

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА МІНІМІЗАЦІЯ ПОХИБОК ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

(За оглядом закордонних публікацій)

**М.Ф. Сопель**, докт.техн.наук, **В.І. Паньків**, **Є.М. Танкевич**, докт.техн.наук, **В.В. Гречко**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.  
e-mail: [pankiv.volodimir@gmail.com](mailto:pankiv.volodimir@gmail.com)

*Представлено опис та результати аналізу основних характеристик та особливостей нових сучасних математичних моделей трансформаторів струму високовольтних електричних мереж за кордоном. Досліджено основні причини насичення магнітних систем трансформаторів струму і спотворення їхніх вторинних струмів, а також найбільш досконалі на сьогодні методи і способи зменшення похибок трансформаторів струму за таких робочих умов. На основі проведеного аналізу найбільш придатною для комп'ютерного моделювання при проектуванні, налаштуванні та оцінюванні продуктивності пристроїв і систем керування та захисту електричних мереж визнана математична модель трансформатора струму, побудована на феноменологічній теорії Прейзаха. Бібл. 31, рис. 1.*

**Ключові слова:** трансформатор струму, залишкова індукція, насичення, гістерезис, математична модель, похибка, корекція.

**Вступ.** Сучасні енергосистеми характеризуються зростанням складності та розмірів, тим самим викликаючи підвищення рівнів струмів короткого замикання (КЗ). Крім того в електроенергетичних системах виникає багато видів порушень, що призводять до електромагнітних перехідних процесів. Такими порушеннями є блискавки, штатні режими роботи такі, як включення або відключення напруги; підключення, відключення і перемикання індуктивних і ємнісних навантажень та ін.

При цьому незмінним є прагнення підвищувати швидкодію релейного захисту та автоматичного керування. У випадку системного пошкодження і навіть штатних перемикань, тобто раптової зміни параметрів і режиму енергосистеми, відбувається перерозподіл збереженої електричної і магнітної енергій в її ємнісних та індуктивних елементах. У цьому разі вважається, що енергосистема проходить через перехідний режим, після якого вона досягне нового усталеного режиму.

Впродовж перших декількох періодів перехідного режиму швидкодіючі релейні захисти очікують, щоб прийняти правильне рішення по збереженню стабільності системи і мінімізувати ступінь пошкодження обладнання. Зазвичай захисні реле виробляють свої рішення базуючися на струмах та напругах фундаментальної частоти 50 Гц. Однак часто при перехідних режимах струми і напруги є сильно спотвореними внаслідок появи в їхньому складі експоненціальної затухаючої постійної складової або складових, частоти яких є нижчими або вищими від основної частоти енергосистеми.

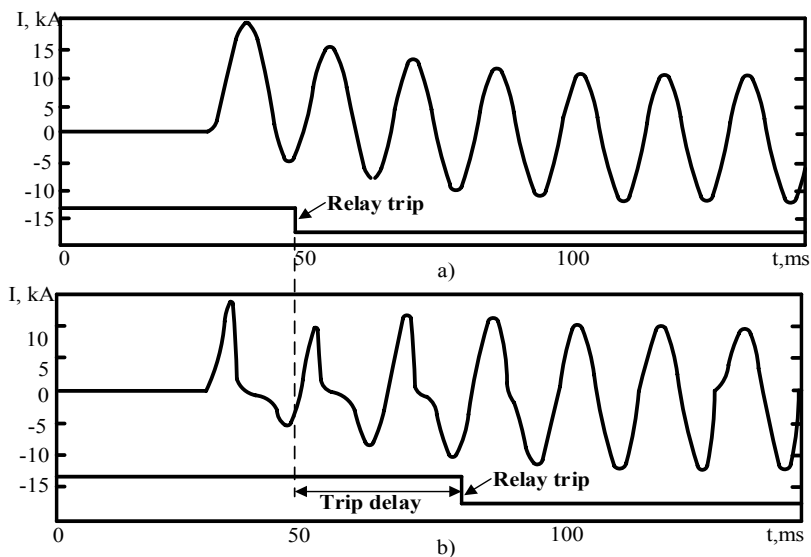
Такі перехідні спотворення струмів і напруг створюються вимірювальними трансформаторами струму (ТС) і напруги (ТН) через наявність в них магнітопроводів, причому з суттєво нелінійними характеристиками. Ці нелінійні властивості є основним фактором впливу на надійність та захист електроенергетичних систем і можуть спричинити невірні спрацювання, затримку в спрацюванні або інші помилкові дії.

Вищезазначеним і пояснюється актуальність та важливість для забезпечення надійності і ефективності функціонування електроенергетичної галузі досліджень електромагнітних процесів в ТС і постійні намагання вдосконалення їхніх метрологічних характеристик. Насамперед це стосується математичного моделювання цих процесів і відновлення вторинних струмів ТС [24,25]. При цьому слід зазначити, що усі моделі ТС, які використовуються сьогодні, побудовані на певних спрощеннях і мають ряд недоліків. Серед них найбільш вагомими є використання спрощеного опису характеристики намагнічування і неможливість урахування залишкової індукції в магнітопроводі, значення якої є однією з найвпливовіших на результати моделювання початкових даних [24]. Що ж до відомих методів корекції вторинного струму ТС, то усі вони стосуються лише струму одного окремого фазного ТС при однофазному пошкодженні, що є найпростішим випадком, і ніяк не враховують взаємодію і вза-

ємний вплив ТС у групі [25]. Отже, говорити про точність або навіть про придатність цих методів в умовах експлуатації груп ТС не доводиться.

Метою даної роботи є вибір на основі проведеного огляду розроблених за кордоном математичних моделей ТС, аналізу їхніх властивостей, переваг та недоліків найбільш точної та досконалої моделі, яка в найбільшій мірі відображала б хід та особливості процесів намагнічування магнітопроводу ТС, стала б основою точного методу корекції його вторинного струму і була б придатною для комп'ютерного моделювання груп ТС при проектуванні, налаштуванні та оцінюванні продуктивності пристроїв та систем керування та захисту електричних мереж.

**Проблеми використання електромагнітних трансформаторів струму.** Ефект насичення ТС призводить до неточних вимірювань струму, що може призвести до неправильних спрацювань релейного захисту і керування пристроями, які використовують струм як вхідний сигнал [22]. Для



прикладу, спотворена форма струму може призвести до затримки спрацювання реле часу максимального струмового захисту через недооцінку середньоквадратичного значення струму, як це зображено на рисунку: *a* – без насичення, *b* – з насиченням [30]. Дистанційне реле може неправильно визначити значення повного опору кола пошкодження через неточне вимірювання струму фази [20]. Це також значно впливає на пошук місця пошкодження [9].

Виконання ТС з магнітопроводами великих розмірів чи використання високовартісних матеріалів для їхнього виготовлення в значній

мірі дає змогу зменшити ймовірність насичення. Проте ці заходи впливають як на вартість, так і на габарити самого ТС, що значно обмежує масштаби їхнього застосування [11,30].

Використання відносно малих вторинних навантажень ТС також сприяє зменшенню магнітного потоку в його магнітопроводі, а відповідно і зменшенню ймовірності його насичення. Оскільки сучасні мікропроцесорні пристрої захисту, автоматики, обліку та вимірювання будуються на мікропроцесорній основі, то їхній сумарний опір є досить незначним у порівнянні з опором електромагнітних пристроїв, і такий спосіб зменшення ймовірності насичення є можливим. Але слід зауважити, що в енергосистемах є ще значна кількість підстанцій з пристроями на електромеханічній основі, де впровадження мікропроцесорної техніки з економічної точки зору в найближчі роки буде неможливим. Більш того, якщо в магнітопроводі ТС присутнє залишкове намагнічування, яке в ТС без повітряних зазорів контролювати практично не можливо [5,7], напруга насичення магнітопроводу може зростати в декілька разів і перевищувати напругу, рекомендовану стандартом.

Розглянемо більш детально фактори, які можуть впливати на поведінку ТС у перехідних режимах енергосистем і відповідно на ймовірність виникнення насичення їхніх магнітопроводів. До них належать: сталі часу первинного та вторинного кола ТС [3,21], вже згадувана раніше залишкова індукція в його магнітопроводі [3,5,7,21], характеристика намагнічування (ХН) ТС [29], а також момент виникнення пошкодження та постійна складова струму КЗ [20,21,30]. Відомі також випадки, коли насичення може відбуватися при простому симетричному КЗ [2,29].

Стала часу первинного кола в значній мірі залежить від місця та типу пошкодження. Вона впливає на швидкість затухання постійної складової струму КЗ. На постійну складову струму КЗ також впливає її амплітудне значення, яке залежить від моменту виникнення пошкодження. Взагалі постійна складова може призводити до значних насичень магнітопроводу ТС і відповідно до значних спотворень вторинного струму.

Дуже вагомим фактором в експлуатації ТС та й відповідно в дослідженнях їхньої поведінки в перехідних режимах має залишкова індукція. ТС зі значною залишковою індукцією може насичуватися на перших циклах відразу ж після виникнення пошкодження в системі. Після цього залишкова індукція зменшується внаслідок збудження змінним струмом [7,21]. Враховуючи той фактор, що ре-

лейний захист скоріш за все зафіксує пошкодження та дасть команду на відключення, деяке значення залишкової індукції за будь-яких обставин збережеться в магнітопроводі ТС.

Як зазначено в [5], найбільший зафіксований залишковий потік у ТС, що знаходяться в експлуатації, становив майже 90% від максимального потоку. Результатом такої залишкової індукції, як правило, є значна динамічна похибка ТС, що впливає на певні швидкодіючі диференціальні реле [7].

Найбільш практичним шляхом контролю залишкової індукції вважається виконання повітряного зазору в магнітопроводі. Навіть маленький зазор спричиняє значне зменшення можливої залишкової індукції [7]. Проте виконання зазору знижує точність вимірювання струму в нормальних режимах, що є неприпустимим, насамперед, для систем обліку кількості електроенергії, моніторингу параметрів електрообладнання і режимів енергосистем та звичайних вимірювань. У роботі [26] відзначено ряд інших недоліків, серед яких складність у підтриманні заводських допусків для малих фізичних розмірів необхідних зазорів (для управління залишковою намагніченістю); зазори збільшують вторинний опір витоків, що несприятливо впливає на диференціальні релейні схеми з великим повним опором; збільшення струму намагнічування внаслідок введення зазору може призвести до неспрацювання переривання реле прилеглого вимикача кільцевої або еквівалентної схеми шин; збільшення струму намагнічування, як результат введення зазору в магнітопроводі, призводить до збільшення коефіцієнта трансформації і кутової похибки трансформатора струму. Принагідно зазначити, що вітчизняною практикою побудови ТС із зазором було доведено, що відзначені труднощі можна подолати, якщо до осердя ТС, що забезпечує допустиму похибку в перехідних режимах, додати суцільне осердя, що забезпечує клас точності вимірювального виходу ТС у нормальному режимі, або ж застосувати ємнісну компенсацію похибок ТС, яка здійснюється шляхом підключення на затискачі його вторинної обмотки компенсуючої ємності. Однак проблеми такого роду вирішуються нечасто, оскільки, як зазначено в [23], такі типи ТС рідко зустрічаються в експлуатації більшості передавальних мереж високої напруги.

На основі результатів проведених багаточисленних дослідів відносно того, яким чином насичення магнітопроводу ТС може впливати на затримку в спрацюванні максимального струмового захисту в розподільчих мережах, автори [2] наголошують на тому, що використання стандарту IEEE C.37.110-1996 [30] є недостатнім для правильного розрахунку уставок максимальних струмових захистів і наводять ряд рекомендацій щодо більш точного налаштування захисту. Серед них важливе місце посідає застосування сучасних моделей ТС, побудованих на використанні гістерезисних моделей намагнічування їхніх магнітопроводів, які здатні правильно відображати поведінку ТС при перехідних процесах в енергосистемах.

**Математичні моделі електромагнітних трансформаторів струму.** Однією з найбільш розповсюджених моделей, яка дозволяє правильно аналізувати електромагнітні процеси (ЕМП), що протікають у ТС, та з високою точністю одержувати його вторинний струм, є фізична модель, розроблена на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона [3,16,27,31]. Гістерезисні властивості магнітних матеріалів згідно з цією теорією описуються за допомогою двох складових намагніченості: прямої та зворотної, які тісно пов'язані з безгістерезисною характеристикою намагнічування (ХН). Для опису безгістерезисної ХН у цій теорії використовується модифікована функція Ланджевiна [3,4,16,19,27,31]. У працях [3,27] наголошується на можливості застосування інших апроксимуючих функцій, які дають можливість дещо краще описати безгістерезисну ХН, а відповідно і зони насичення на основній гістерезисній петлі. Взагалі зв'язок між напруженістю магнітного поля та намагніченістю (з урахуванням вищезгаданих складових) описується диференціальним рівнянням першого порядку. Це рівняння потребує визначення п'яти невідомих параметрів, так званих параметрів моделі Джайлса-Атертона, які впливають на точність побудови гістерезисних петель [4,19]. Переважно для визначення цих параметрів використовують прямий пошук або його модифікації [4]. У світовій практиці відомі спроби застосування з цією метою різних оптимізаційних алгоритмів, таких як: генетичний алгоритм, диференціальна еволюція, оптимізація по потоку частинок, імітація відпалу та математичний мета-евристичний метод оптимізації SFL (Shuffled frog leaping). Проведене досить широке порівняння шести вищезгаданих алгоритмів оптимізації показало, що метод SFL є більш точним і потребує менших витрат часу для обчислення у порівнянні з іншими методами та алгоритмами [19].

Визначення параметрів моделі Джайлса-Атертона потребує також знання деяких експериментальних даних, таких як: коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення, нормальна, безгістерезисна, коерцитивна і залишкова диференціальні проникності [4].

Порівняння математичного моделювання гістерезисних петель на основі теорії Джайлса-Атертона з гістерезисними петлями, одержаними експериментальним шляхом, показало велику точність їхнього співпадіння [3,16,31].

Іншою, широкоживаною і в деякій мірі навіть точнішою моделлю для аналізу ЕМП у ТС є модель, побудована на феноменологічній теорії Прейзаха [21]. Ця теорія передбачає, що будь-який феромагнітний матеріал складається з окремих диполів (гістеронів), кожний з яких має свою функцію розподілу, а процес намагнічення зразка відбувається не миттєво, а з деякою кінцевою швидкістю. Відповідно моделі ТС на основі теорії Прейзаха можуть розрізнятися методом представлення функції розподілу диполів.

Точне представлення функції розподілу можна здійснити за допомогою функції Еверта [4, 10,15], побудова якої ґрунтується на використанні інтерполяційних методів представлення ХН. Серед них інтерполяція поверхневими сплайнами [10], кусково-кубічні сплайни Ерміта [15], а також спеціальний інтерполяційний метод, запропонований у [4].

Використання функції Еверта дещо ускладнює обчислювальний процес через те, що на початку моделювання відбувається завантаження експериментальних даних і побудова інтерпольованої функції [4]. Через складність реалізації функції розподілу часто використовують її наближення, що вже було застосовано для моделювання магнітопроводів ТС [21]. Пропонуються також для розгляду функція розподілу Лоуренса, функція розподілу Гауса або нормально-логіфічна функція розподілу Гауса [10]. Практично використання тієї чи іншої функції розподілу залежить від матеріалу для виготовлення магнітопроводу.

Вхідними даними для моделей, побудованих на теорії Прейзаха, є набір центральносиметричних гістерезисних петель, одержаних експериментально при різних амплітудах змінного поля. У роботі [9] стверджується, що для визначення параметрів моделі достатньо лише основної гістерезисної петлі.

Модель на основі теорії Прейзаха, запропонована в [21], визначає форму часткових петель гістерезису незалежно від основної петлі гістерезису. А це, у свою чергу, впливає на характер процесу намагнічування, сталу часу вторинного кола і залишковий потік після відключення струму. Як показують результати порівняння петель, побудованих за цією моделлю, з петлями гістерезису інших моделей та фактичними гістерезисними петлями реального ТС, вказана модель забезпечує більшу гнучкість часткових і основної гістерезисних петель у порівнянні з іншими моделями і дуже високе співпадіння з петлями, отриманими експериментально.

Досить цікавою є модель ТС, запропонована в [9], де нелінійні характеристики магнітопроводу моделюються за допомогою трьох паралельно з'єднаних опорів. Один з них – активний лінійний опір відображає класичні втрати на вихрові струми, інший – нелінійний активний опір моделює аномальні втрати в магнітопроводі. Нелінійна індуктивність моделює насичення і гістерезис у магнітопроводі ТС за алгоритмом Талукдари і Бейлі. Модель є дуже простою в алгоритмізації та розрахунках. Адекватність запропонованої моделі підтверджена її експериментальною перевіркою та порівнянням з моделлю Прейзаха (яка вважається однією з найточніших) при різних вхідних сигналах. Недоліком цієї моделі вважається необхідність зняття основної петлі гістерезису на постійному струмі, що належить до вхідних параметрів для моделювання, а також деякі додаткові проблеми, пов'язані з розрахунком декількох параметрів моделі.

Часто на практиці для моделювання нелінійної поведінки магнітопроводу ТС використовують стандартні програми розрахунків ЕМП [9,21,27]. Зокрема у вільному для користувачів доступі існує програмне забезпечення АТР/ЕМТР, що дозволяє представити магнітопровід ТС нелінійним реактором, який описується системою нелінійних рівнянь, та паралельно з'єднаним резистором. Перевагою такої моделі є можливість відображення впливу залишкового потоку в магнітопроводі ТС. Основний її недолік – необхідність попередньої обробки даних точок ХН ТС, заданої в координатах напруження-струм, для розрахунку параметрів моделі. Крім того, як зазначено в [21], побудовані часткові петлі не мають такої гнучкості, як фактичні петлі ТС. Іншим, практично аналогічним програмним забезпеченням є PSCAD/EMTDC, де ТС моделюється паралельним з'єднанням нелінійних індуктивності та резистора. Індуктивність задається характеристикою потік-струм, описаною дробово-степеневим рядом. Втрати на вихрові струми і гістерезисні втрати (з врахуванням коефіцієнта Штейметца) відображені нелінійним резистором [26]. Ця модель виробляє результати, близькі до фактичних [9].

У [6] представлено ще один досить цікавий підхід до опису гістерезисних властивостей магнітопроводів. Проте цей підхід ще не був застосований для моделювання ТС. У загальному суть даної теорії полягає у використанні двох гіперболічних кривих, які в залежності від полярності сигналу

збудження, описують зростаючу та спадаючу частини гістерезисних петель. Для перевірки її придатності для ТС в подальшому необхідні відповідні дослідження.

За великої кількості підходів до моделювання нелінійних властивостей магнітопроводів дуже мало з них частотно орієнтовані. Однак є приклад розробки гармонічно орієнтованої моделі, що дозволяє аналізувати неправильні або спеціальні форми характеристик збудження нелінійних трансформаторів [8]. Для такого моделювання використано комбінацію методів гармонічного балансу та кусково-лінійної апроксимації характеристичної функції. Проте слід зауважити, що дана теорія ще не використовувалася для моделювання поведінки ТС.

**Методи та засоби мінімізації похибок електромагнітних ТС.** Враховуючи проблеми, описані вище, дослідники різних країн працюють над вдосконаленням математичного моделювання ТС, зокрема явища гістерезису, намагаються різними методами виявляти насичення магнітопроводів ТС та боротися з залишковою індукцією в них. Усі ці дії мають за мету зменшення похибок ТС та підвищення точності вимірювального перетворення струмів ЛЕП як в усталених, так і в перехідних режимах їхньої роботи.

Так у [17] запропоновано метод компенсації вторинного струму, що базується на використанні моделі ТС з апроксимованою ХН, за допомогою якої визначається струм намагнічування, що додається до вимірюваного вторинного струму ТС. У [18] цей метод удосконалено шляхом використання простої і легкої в реалізації скалярної гістерезисної моделі. Перевірка запропонованих методів, проведена на декількох різних типах ТС при синусоїдальному збудженні та при синусоїдальному з невеликим вмістом гармонічної складової струмі, показала досить задовільні результати [17,18]. Проте слід відзначити, що використання такого підходу до розв'язання цієї проблеми не дозволяє враховувати можливу наявність залишкового потоку в магнітопроводі ТС, а відповідно і говорити про їхню придатність у реальних експлуатаційних умовах.

Специфічний метод корекції вторинного струму ТС запропоновано в роботі [13]. Цей метод передбачає визначення струму намагнічування за ХН та додавання його до вторинного струму відповідно до коефіцієнта трансформації. Відмінність цього методу від попереднього полягає в можливості врахування при корекції залишкового потоку в магнітопроводі. Запропонований метод перевірено за різних умов, що впливають на рівень насичення, серед яких момент виникнення пошкодження, стала часу первинного кола, залишковий потік у магнітопроводі ТС. Незважаючи на те, що даний алгоритм не враховує гістерезисних властивостей матеріалу магнітопроводу, результати, представлені у даній статті, свідчать про високу точність корекції сигналу.

Існує також ряд методів, які не використовують для корекції параметри та моделі ТС, спотвореного в результаті насичення магнітопроводу, вторинного струму, а виконують корекцію за вибірками вимірюваного струму за допомогою різноманітних алгоритмів [1,20]. Зокрема у [20] запропоновано метод фіксації насичення з подальшими розділенням вторинного струму на насичену і ненасичену частини та відбудовою його насиченої частини. Тут заявлено, що представлений у ній алгоритм може бути застосований у режимі реального часу, проте точне вимірювання струму можливе приблизно через 25 мс після моменту виникнення пошкодження. Проте запропонований алгоритм не був перевірений на придатність за наявності гармонічної складової в струмі КЗ, що знову ж таки ставить під певний сумнів його застосування. На точність методу значно впливає величина аперіодичної складової струму КЗ.

В [11] для виявлення насичення магнітопроводу та компенсації спотвореного вторинного струму ТС запропоновано метод, що поєднує вейвлет перетворення і метод регресії. Спершу використовується вейвлет перетворення для виділення спотвореної частини вторинного струму, далі – метод регресії для компенсації спотвореної частини струму на основі особливостей, отриманих від ненасиченої частини вторинного струму. Цей метод дозволяє компенсувати спотворений струм, включно і за наявності залишкового намагнічування в магнітопроводі. Слід зазначити, що у випадку значно спотвореного струму, коли кількість неспотворених вибірок ненасиченої частини сигналу на першому періоді є недостатньою для точної регресії його насиченої частини, труднощі використання методу зростають, значно збільшуючи розрахункове навантаження.

У багатьох наукових публікаціях, зокрема в [14,30], йдеться про застосування для корекції струму насиченого ТС, спричиненого пошкодженням в енергосистемі, штучних нейронних мереж. Авторами роботи [30] штучну нейронну мережу було навчено будувати зворотні передавальні функції ТС. Потім мережа використовує їх для перебудови вихідного сигналу ТС в залежності від параметрів вхідного сигналу (первинного струму). Однак, у вказаній статті не розглядалася залишкова намагні-

ченість магнітопроводу, а штучна нейронна мережа була навчена тільки для випадку активного вторинного навантаження ТС.

Дещо інший підхід до компенсації спотвореного вторинного струму ТС з використанням штучної нейронної мережі запропоновано в [14]. Автори провели її навчання за допомогою моделювання різних типів пошкоджень в енергосистемі, що характеризувалися амплітудами струмів КЗ, сталими часу первинного кола і моментами виникнення КЗ, моделюванням залишкових потоків у магнітопроводі та вторинних навантажень ТС. Цей метод дозволяє точно відтворювати вторинний струм відповідно до коефіцієнта трансформації ТС як за наявності, так і за відсутності залишкового потоку в його магнітопроводі.

Практичне застосування штучних нейронних мереж для корекції вторинного струму не дозволяє вважати цей метод узагальненим для реальних ситуацій, що є його значним недоліком. Перевагою ж цього підходу є можливість корекції в режимі реального часу.

Для виявлення області насичення магнітопроводів ТС розроблено і впроваджено багато алгоритмів на основі використання похідних струмів і високочастотних характеристик, які фіксуються диференціальними фільтрами. Метод функції другої різниці вторинного струму і метод, який базується на функції третьої різниці, що були використані і порівняні в [28], показують досить непоганий результат корекції вторинного струму за відсутності гармонічних складових. Проте у випадку присутності у струмі гармонічних складових, зокрема другої, яку зазвичай генерують генератори з несиметричним ротором при струмах КЗ, запропоновані методи корекції призводять до значних похибок.

У [23] запропоновано комбінований метод виявлення насичення, який аналізує вторинний сигнал струму ТС у часовій та частотній областях. Для аналізу в частотній області автори використали алгоритм швидкого перетворення Фур'є та цифровий фільтр Баттерворта. Для аналізу в часовій області використано функцію другої різниці. Таким чином комбінація цих методів дозволяє виявляти насичення з досить високим ступенем точності. Після знаходження насиченої частини сигналу застосовується метод корекції, який ґрунтується на методі найменших квадратів. Автори провели перевірку запропонованого алгоритму на значній кількості сигналів струмів, використовуючи програмне забезпечення Digsilent Power Factory і Matlab, та на реальних осцилограмах, зафіксованих диспетчерським пунктом в енергосистемі Німеччини. Результати свідчать про досить високу точність виявлення насичення та корекції вторинного струму ТС.

Визначати насичення магнітопроводу ТС через аналіз наявності у вторинному струмі затухаючої постійної складової за допомогою дробових дискретних перетворень Фур'є пропонується в [29]. Відновлення струму відбувається завдяки застосуванню вибірок струму при ненасиченому магнітопроводі та специфічних, запропонованих авторами, співвідношень. Цей метод перевірено для великої кількості можливих пошкоджень на програмному забезпеченні Matlab. Зокрема, моделювалися випадки значного та незначного насичення, випадки різних залишкових намагніченостей, включно і максимально можливої, випадок насичення змінною складовою та за незначного вмісту гармонічної складової в первинному струмі. Практично в усіх випадках запропонований метод показав позитивні результати.

#### **Висновки.**

Закордонні автори у своїх публікаціях спільні у тому, що:

– основною причиною помилкових спрацювань або затримок у спрацюванні різних видів релейних захистів є спотворення струмів в електромагнітних ТС з нелінійними характеристиками, що відбуваються внаслідок насичення їхніх магнітопроводів при пошкодженнях в енергосистемі;

– до основних факторів, які впливають на насичення магнітопроводів ТС, належать: момент виникнення КЗ, амплітуда постійної складової струму КЗ, стала часу первинного кола при пошкодженнях, залишкова індукція в магнітопроводі ТС та його вторинне навантаження.

З проведеного аналізу робимо висновки:

– моделі ТС, побудовані на використанні однозначної характеристики намагнічування, не дозволяють визначити залишковий магнітний потік у магнітопроводі ТС після відключення первинного струму;

– для визначення значення залишкового потоку в магнітопроводі дуже важливим є відображення в моделі ТС явища магнітного гістерезису. Врахування впливу цього явища на поведінку ТС особливо важливе для ТС без повітряних зазорів, які використовуються у схемах автоматичного повторного включення;

– при настроюванні та аналізі функціонування пристроїв та систем релейного захисту слід використовувати математичне моделювання їхніх струмових кіл із застосуванням гістерезисних моделей ТС груп;

– найбільш точною моделлю опису нелінійних властивостей магнітних матеріалів є модель, побудована на основі феноменологічної теорії Прейзаха. Використання цієї моделі при моделюванні ТС забезпечує можливість побудови гнучких і точних основної та часткових петель гістерезису.

– для корекції спотворених у результаті насичення магнітопроводів вторинних струмів ТС пропонуються різні методи та алгоритми, які базуються на схемних моделях, штучних нейронних мережах та різноманітних властивостях сигналів ТС, однак всі вони мають певні недоліки. Необхідна розробка універсального методу.

1. *Ajaei F.B., Sanaye-Pasand M., Davarpanah M.* Compensation of the current-transformer saturation effects for digital relays // IEEE Transaction on power delivery. – 2011. – Vol. 26. – No 4. – Pp. 2531-2540.

2. *Al-Abbas N.H.* Efficient proposed solutions for current transformers saturation effects on overcurrent relays operations in distribution systems // Proceedings of 44th International Universities power engineering conference (UPEC), 1-4 Sept., 2009, Glasgow. – 2009. – Pp. 1-6.

3. *Annakkage U.D., McLaren P.G., Jayasinghe R.P., Parker A.D.* A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis // IEEE Transaction on power delivery. – 2000. – Vol. 15. – No 1. – Pp. 57-61.

4. *Benabou A., Clene S., Piriou F.* Comparison of Preisach and Jiles-Atherton models to take into account hysteresis phenomenon for finite element analysis // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2003. – Vol. 261. – No 1-2. – Pp. 139-160.

5. *Bruce R.G., Wright A.* Remanent flux in current-transformer cores // IET Proceedings of the Institution of electrical engineers. – 1966. – Vol. 113. – No 5. – Pp. 915-920.

6. *Chan J.H., Vladimirescu A., Gao X.-C.* Nonlinear transformer model for circuit simulation // IEEE Transactions on computer-aided design. – 1991. – Vol. 10. – No 4. – Pp. 476-482.

7. *Conner E.E., Greb R.G., Wentz E.C.* Control of residual flux in current transformers // IEEE Transaction on power apparatus and systems. – 1973. – Vol. PAS-92. – No 4. – Pp. 1266-1233.

8. *Damjanovic A., Islam A., Domijan A.* Harmonic domain modeling of transformer nonlinear characteristic with piece-wise approximation // 14th International conference on harmonics and quality of power (ICHQP), 26-29 Sept., 2010, Bergamo. – 2010. – Pp. 1-6.

9. *Guerra F., Das C.F., Mota W.S.* Current transformer model // IEEE Transaction on power delivery. – 2007. – Vol. 22. – No 1. – Pp. 187-194.

10. *Henze O., Rucker W.M.* Identification procedures of Preisach model // IEEE Transactions on magnetics. – 2002. – Vol. 38. – No 2. – Pp. 833-836.

11. *Hong Y.-Y., Wei D.-W.* Compensation of distorted secondary current caused by saturation and remanence in a current transformer // IEEE Transaction on power delivery. – 2010. – Vol. 25. – No 1. – Pp. 47-54.

12. IEEE Guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes: IEEE C37.110-1996. – N-Y.: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996. – 59 p.

13. *Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K.* Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers // IEE Proceedings on electric power applications. – 1996. – Vol. 143. – No 1. – Pp. 41-49.

14. *Khorashadi-Zaden H., Sanaye-Pasand M.* Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // IEEE Transaction on power delivery. – 2006. – Vol. 21. – No 1. – Pp. 73-79.

15. *Kuczmann M.* Dynamic Preisach hysteresis model // Journal of advanced research in physics. – 2010. – Vol. 1. – No 1. – Pp. 1-5.

16. *Liu S.-T., Huang S.-R., Chen H.-W.* Using TACS functions within EMTP to set up current-transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis // IEEE Transaction on power delivery. – 2007. – Vol. 22. – No 4. – Pp. 2222-2227.

17. *Locci N., Muscas C.* A digital compensation method for improving current transformer accuracy // IEEE Transaction on power delivery. – 2000. – Vol. 15. – No 4. – Pp. 1104-1109.

18. *Locci N., Muscas C.* Hysteresis and eddy currents compensation in current transformer // IEEE Transaction on power delivery. – 2001. – Vol. 16. – No 2. – Pp. 154-159.

19. *Naghizadeh R.-A., Vahidi B., Hosseinian S.H.* Parameter identification of Jiles-Atherton model using SFLA // Computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 2012. – Vol. 31. – No 4. – Pp. 1293-1309.

20. *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.

21. Rezaei-Zare A., Iravany R., Sanaye-Pasand M. An accurate current transformer model based on Preisach theory for the analysis of electromagnetic transients // IEEE Transaction on power delivery. – 2008. – Vol. 23. – No 1. – Pp. 233-242.
22. Smith T., Hunt R. Current transformer saturation effects on coordinating interval // IEEE Transactions on industry applications. – 2013. – Vol. 49. – No 2. – Pp. 825-831.
23. Stachel P., Schegner P. Detection and correction of current transformer saturation effects in secondary current signals // IEEE Power & energy society general meeting PES'09., 26-30 July 2009, Calgary. – 2009. – Pp. 1-6.
24. Stognii B.S., Selehman N.A., Tankevych Ye.N. A mathematical model of electromagnetic processes in the current transformers and determining its characteristics // Tekhnicheskaja Elektrodynamika. – 1993. – No 2. – Pp. 58-61.
25. Stognii B.S., Selehman N.A., Tankevych Ye.N. Digital restoration of the output of high-voltage measurement current transformers // Tekhnicheskaja Elektrodynamika. – 1993. – No 5. – Pp. 64-67.
26. The effects of EHV relaying of fault and switching generated transients / Working group 04 of study committee № 34. Protection // La conference international des grands reseaux electrique, Cigre session 30 aug. – 7 sept., 1978. – Pp. 1-15.
27. Tziouvaras D.A., McLaren P., Alexander G. Mathematical models for current, voltage and coupling capacitor voltage transformers // IEEE Transaction on power delivery. – 2000. – Vol. 15. – No 1. – Pp. 62-72.
28. Wisniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performance // IEEE Transaction on power delivery. – 2008. – Vol. 23. – No 2. – Pp. 624-632.
29. Yu C.-S. Detection and correction of saturated current transformer measurements using decaying DC components // IEEE Transaction on power delivery. – 2010. – Vol. 25. – No 3. – Pp. 1340-1347.
30. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // IEEE Transaction on power delivery. – 2001. – Vol. 16. – No 2. – Pp. 189-194.
31. Zhang D., Chen J.C., Phung T. Study on transient and frequency response of current transformer using Jiles-Atherton model // 2013 IEEE TENCN Spring conference, 17-19 April, 2013, Sydney. – 2013. – Pp. 257-261.

УДК 621.314.222.68

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

**М.Ф. Сопель, докт.техн.наук, В.И. Панькив, Е.Н. Танкевич, докт.техн.наук, В.В. Гречко**

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

**e-mail: [pankiv.volodimir@gmail.com](mailto:pankiv.volodimir@gmail.com)**

*Представлены результаты поиска и описание основных характеристик и особенностей новых современных математических моделей трансформаторов тока высоковольтных электрических сетей. Выявлены основные причины насыщения магнитных систем трансформаторов тока и искажения их вторичных токов, а также наиболее совершенные на сегодняшний день методы и способы уменьшения погрешностей трансформаторов тока в рабочих условиях. Цель исследования – обоснованный выбор математической модели трансформаторов тока, наиболее подходящей для их компьютерного моделирования при проектировании, настройке и оценке производительности устройств и систем защиты электрических сетей. Библ. 31, рис. 1.*

**Ключевые слова:** трансформатор тока, остаточная индукция, насыщение, математическая модель, погрешность, коррекция.

## PROBLEMS USING, MODELING AND MINIMIZING ERRORS OF HIGH VOLTAGE CURRENT TRANSFORMERS

**M.F. Sopol, V.I. Pankiv, E.M. Tankevych, V.V. Grechko**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

**e-mail: [pankiv.volodimir@gmail.com](mailto:pankiv.volodimir@gmail.com)**

*The results of the search and description of the main characteristics and features of new modern mathematical models of current transformers of high-voltage electrical networks was described. The main causes of saturation of magnetic core of current transformer and distortion of the secondary current, and the most advanced to date methods and ways to reduce errors of current transformers for such operating conditions was determine. The objective of this research is to informed choice of the mathematical model of current transformers, the most suitable for their computer modeling in the design, setting up and evaluate the performance of devices and protection systems of electrical networks.*

References 31, figure 1.

**Keywords:** current transformer, residual induction, saturation, mathematical model, error, correction.

Надійшла 26.08.2015

Остаточний варіант 02.11.2015