

УДК 621.314.224

## СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СТРУМУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ

**В.І. Паньків**, асп., **Є.М. Танкевич**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

*Розраховано електромагнітні процеси в трансформаторах струму високовольтних первинних вимірювальних каналів (ПВК) струму в перехідних режимах роботи енергосистеми та досліджено спектральні характеристики ПВК струму за допомогою дискретних перетворень Фур'є. Вказано на можливість і доцільність використання спектральних характеристик ПВК для розв'язання низки задач електроенергетики. Бібл. 6, рис. 3.*

**Ключові слова:** трансформатор струму, насичення, спектральний аналіз, перетворення Фур'є.

**Вступ.** Технічна досконалість систем автоматизації електроенергетичних об'єктів (ЕЕО) – розподільних пристроїв електричних станцій, високовольтних електричних підстанцій систем електропостачання і споживачів електроенергії є одним із вирішальних чинників ефективного та надійного функціонування електроенергетичної галузі країни. Постійно зростаюча в процесі розвитку енергосистем складність задач автоматизації супроводжується зростанням ролі інформаційного забезпечення в їх керуванні, а відповідно і підвищенням вимог до інформації про стан і режими ЕЕО та засобів її одержання. Останні в своєму розвитку пройшли шлях від найпростішої структури в складі лише одного датчика до сучасної, що складається з аналогової, аналого-цифрової та цифрової частин, об'єднаних під назвою первинний вимірювальний канал (ПВК). Основу ПВК складає коло послідовно з'єднаних вимірювальних перетворювачів включно з датчиком – первинним вимірювальним перетворювачем, яким є високовольтний трансформатор струму (ТС), що безпосередньо сприймає вимірювальний сигнал. ПВК призначені для розв'язання однієї з основних задач у разі практичної реалізації цифрових систем управління ЕЕО – одержання з потрібною точністю, швидкістю та надійністю кількісної інформації про контрольовані процеси в первинній мережі, її попередньої обробки і введення в наступні структурні компоненти спеціалізованих пристроїв систем керування найнижчого ієрархічного рівня [1].

ПВК струму та напруги як основні засоби одержання та формування єдиної інформаційної бази даних СКА ЕЕО значною мірою визначають їх технічний рівень і ефективність функціонування комплексів та систем усіх наступних ієрархічних рівнів керування електроенергетичною системою (ЕЕС). Водночас відомо, що через нелінійність та неоднозначність характеристик ТС, що є основними компонентами ПВК, їх вторинні струми можуть містити в певних режимах роботи поряд з основною частотою вищі гармонічні складові та високочастотний шум, що може спричинити неправильне функціонування цифрових систем вимірювання, моніторингу, захисту, автоматики і керування електричних підстанцій систем електропостачання. Це, а також велика потреба електроенергетики в досконалих засобах вимірювання електричних величин визначають актуальність задачі розрахунку електромагнітних процесів у ТС ПВК у перехідних режимах ЕЕС і дослідження спектральних характеристик вихідних сигналів ПВК.

**Мета роботи.** Розрахунки вторинних струмів високовольтних ТС у складі ПВК струму в перехідних режимах ЕЕС і їх спектральних характеристик та оцінювання можливості та доцільності використання останніх для покращення якості розв'язання деяких актуальних задач електроенергетики.

**Структурна схема і призначення окремих компонентів ПВК.** Структурні схеми ПВК від елементарних до складних сучасних, які найчастіше зустрічаються в ЕС, наведено та розглянуто в праці [1]. На рис. 1 наведена структурна схема ПВК струму, яка є найбільш характерною для вимірювально-інформаційних систем цифрових підстанцій ЕЕС (ПП – про-

міжний перетворювач;  $\Phi$  – фільтр; К – комутатор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; АЗ – апаратне забезпечення; ПЗ – програмне забезпечення; ВС – вимірювання сигналу; ОС – обчислювальна система).

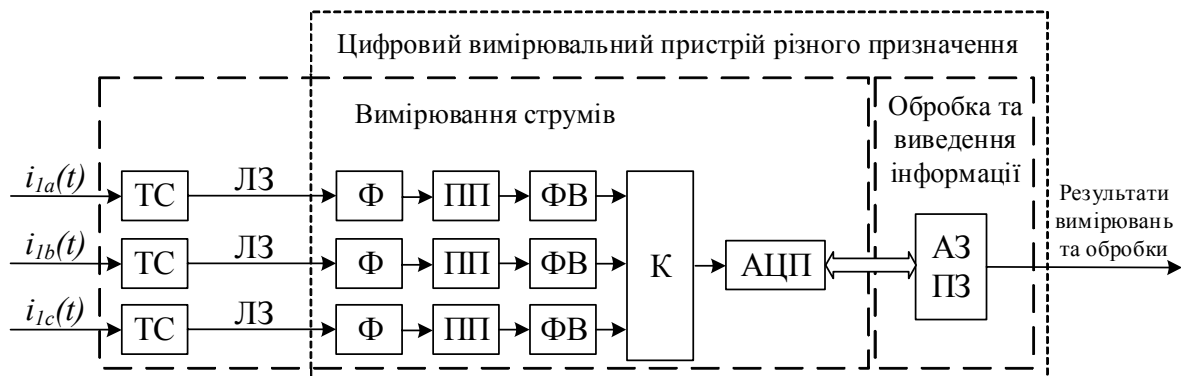


Рис. 1

Фазні струми ЛЕП  $i_{1a}(t), i_{1b}(t), i_{1c}(t)$  у разі проходження через ПВК зазнають низку перетворень. Першим і найбільш вагомим перетворенням з точки зору точності є масштабне перетворення струму ТС. Як вже зазначалось, ТС є нелінійними елементами і вносять похибки у трансформацію струму [1, 2 та ін.].

Аналогові фільтри використовуються для зрізу амплітуд та подавлення вищих гармонік і проектується з певною частотою зрізу, не більшою половини частоти дискретизації аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Зазвичай ці фільтри виконуються пасивними (набір послідовно-паралельно з'єднаних конденсаторів і резисторів) або активними (у своїй схемі додатково містять операційні підсилювачі). Найчастіше використовуються пасивні RC фільтри та активні фільтри Чебишева та Баттерворса різних порядків [3]. Проміжні перетворювачі струм/напруга (ПП) виконують перетворення вихідного сигналу в сигнал, придатний для обробки в АЦП, характеризуються високою точністю і тому їх похибками зазвичай нехтують [1]. Після фільтрації та проходження через проміжний перетворювач сигнали проходять до АЦП через комутатор К.

Важливою характеристикою АЦП є довжина його слова, виражена в бітах. Довжина слова впливає на здатність АЦП до відтворення аналогового сигналу в досить докладному цифровому поданні. Найбільш широко використовуваними і комерційно доступними на сьогоднішній день є 12-бітні АЦП послідовного наближення, водночас на ринку вже доступні і 16-бітні АЦП. Іншою важливою характеристикою АЦП є частота дискретизації сигналу, яка з часом і розвитком техніки стабільно зростає, починаючи з 12 вибірок за період основної частоти енергосистеми до значень 96 або 128 вибірок у більш сучасних АЦП [3].

**Моделювання перехідних електромагнітних процесів у ТС.** Для моделювання електромагнітних процесів у ТС (рис. 1) було обрано математичну модель ТС на основі феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона з удосконаленим представленням безгістерезисної характеристики намагнічування дробово-раціональною функцією другого порядку [4]. Досліджувались електромагнітні процеси в ТС типу ТФКН-330 з такими параметрами: номінальний первинний струм  $I_{1n} = 2000$  А; номінальний вторинний струм  $I_{2n} = 1$  А; кількість витків первинної обмотки  $w_1 = 1$ ; кількість витків вторинної обмотки  $w_2 = 1995$ ; середня довжина лінії магнітного потоку  $l_c = 0,957$  м; площа поперечного перерізу магнітопроводу  $S = 15,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; опір вторинної обмотки  $Z_{2обм} \approx R_{2обм} = 8,2$  Ом. Номінальний опір вторинного навантаження  $Z_{2н} = 40$  Ом з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_n = 0,8$ .

У перехідних режимах роботи було розраховано вторинні струми ТС за різних параметрів струмів пошкоджень, а саме різних кратностей струму КЗ, моментів виникнення та сталих часу струму КЗ з присутніми завадами в струмах та без них. Всього досліджено 163 випадки перехідних режимів.

Для розрахунку вторинного струму ТС використана така модель струму КЗ [2]:

$$i_1(t) = I_m [\cos(\varphi_{кз})e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{кз})] + \sqrt{2}I_d \cos(\varphi_d)e^{-t/T_1},$$

де  $I_m$  – амплітуда струму КЗ;  $\varphi_{кз} = (-\psi + \alpha)$  – фаза КЗ, де  $\alpha$  – момент виникнення КЗ,  $\psi$  – зсув фази між напругою та струмом;  $T_1$  – стала часу затухання аперіодичної складової струму КЗ;  $I_d$  – діюче значення струму доаварійного режиму,  $\varphi_d = (-\psi_d + \alpha)$  – фаза навантажувальної складової струму КЗ, де  $\psi_d$  – зсув фази між напругою та струмом у доаварійному режимі. Перша складова миттєвого струму  $i_1(t)$  – це струм КЗ, який зазвичай регламентують у стандартах як модель вхідного сигналу для досліджень електромагнітних процесів у ТС. Друга складова струму КЗ – навантажувальна, дає змогу враховувати вплив доаварійного режиму на повний струм КЗ. Згідно з [2] неврахування цієї складової спричинює додаткову похибку, що становить (5...10) %.

Як модель аналогового фільтра використано модель цифрового фільтра Баттерворса четвертого порядку з кутовою частотою зрізу 400 Гц. Частота дискретизації АЦП становила 6400 Гц.

**Спектральний аналіз струмів ПВК.** Дослідження спектральних характеристик струмів ПВК виконано за допомогою дискретних перетворень Фур'є, в яких спектральна щільність визначається за виразом

$$\dot{S}[k] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} i[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{N}},$$

де функція  $\dot{S}[k]$  – комплексна спектральна щільність  $k$ -ї гармоніки;  $S_k = |\dot{S}[k]|$  – спектральна щільність амплітуд  $k$ -ї гармоніки;  $\arg(\dot{S}[k])$  – фазовий спектр періодичного коливання;  $i[n]$  – вибірки досліджуваного дискретизованого струму.

На рис. 2 зображено декілька з розглянутих випадків КЗ за відсутності в струмі КЗ вищих гармонік та високочастотних завад, які дають змогу наглядно продемонструвати результати досліджень та пояснити ряд електромагнітних процесів у ТС та обчислювальних процесів дискретних перетворень Фур'є. На цьому рисунку для кожного з досліджуваних випадків (а, б, в, г) зображено наведені дискретизовані первинний  $i'_1[n]$  і вторинний  $i_2[n]$  струми ТС та відповідні розраховані спектральні щільності їх амплітуд для аперіодичної складової  $S_0[n]$  та другої гармоніки  $S_2[n]$ . Слід зазначити, що зі зростанням номера гармоніки, спектральні щільності амплітуд цих гармонік ( $S_3[n], S_4[n], S_5[n]...$ ) змінюються подібно до спектральної щільності амплітуди другої гармоніки  $S_2[n]$ . Рівні щільностей амплітуд гармонік зменшуються із збільшенням їх номера і відповідно на рис. 2 зображені лише спектральні щільності аперіодичної складової  $S_0[n]$  та другої гармоніки  $S_2[n]$  як найбільш інформативної.

Як видно з рис. 2 а, через те, що фаза КЗ знаходиться поблизу пікового значення доаварійного струму ( $\varphi_{кз} \approx 90^\circ$  – відсутня аперіодична складова в струмі КЗ), насичення магнітопроводу ТС не відбулось. Проте на початку виникнення КЗ у вікно таких дискретних перетворень Фур'є, довжина якого рівна періоду основної частоти (для АЦП з частотою дискретизації 6400 Гц – 128-й вибір за період) потрапляють вибірки двох режимів – доаварійного та аварійного (струм КЗ), що в свою чергу сигналізує про різкий перерозподіл потужності сигналу між гармоніками. Внаслідок цього з виникненням струму КЗ спостерігається тимчасове різке зростання спектральних щільностей амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$  та для другої гармоніки  $S_2[n]$ , а враховуючи те, що в такому випадку насичення не відбулось, ці щільності амплітуд практично співпадають для наведеного первинного  $i'_1[n]$  та вторинного  $i_2[n]$  струмів.

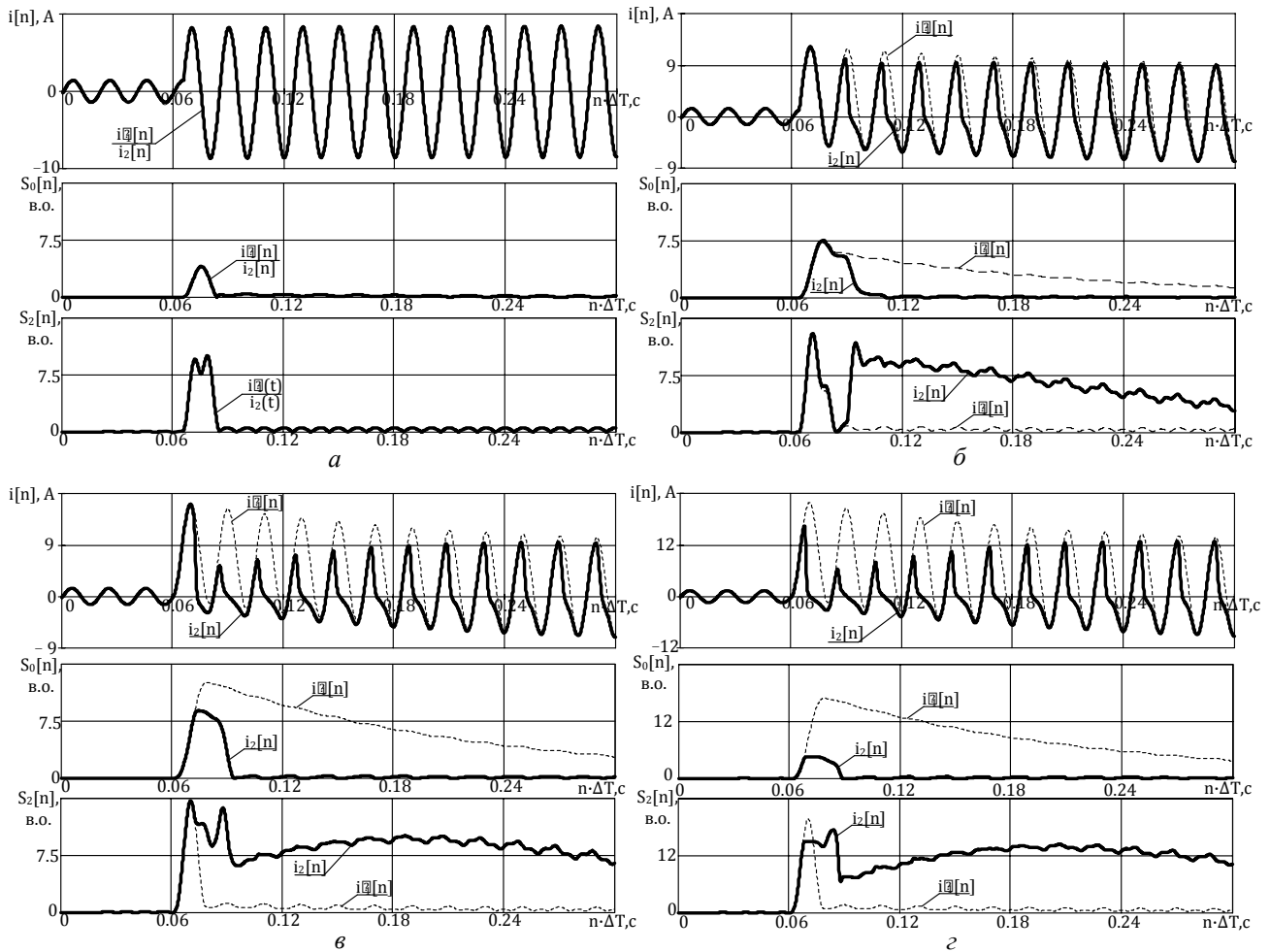


Рис. 2

Випадки, наведені на рис. 2 б, в та г, відображають появу періодів спотворення вторинного струму через виникнення насичення магнітопроводу ТС. У випадках б та в причиною насичення є поява аперіодичної складової в струмі КЗ (фази струму КЗ  $\varphi_{кз}$  становлять відповідно  $60^0$  та  $0^0$ ). Тут, як і для випадку на рис. 2 а, на початку виникнення КЗ відбувається різкий перерозподіл потужності струму між гармоніками, проте на відміну від випадку на рис. 2 а через спотворення вторинного струму внаслідок насичення магнітопроводу ТС спектральні характеристики обох струмів значно відрізняються і видно, що розраховані спектральні щільності амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$  та другої гармоніки  $S_2[n]$  наведеного дискретизованого первинного  $i_1'[n]$  та дискретизованого вторинного  $i_2[n]$  струмів до входження магнітопроводу ТС у режим насичення повністю співпадають, проте з початком входження в режим насичення характеристики значно відрізняються. Зокрема, видно, що внаслідок насичення магнітопроводу ТС аперіодична складова у вторинне коло не проходить і  $S_0[n]$  дискретизованого вторинного струму  $i_2[n]$  практично є близьким нульовому значенню, що свідчить про те, що магнітопровід ТС у режимі насичення є фільтром аперіодичної складової.

Спектральна щільність амплітуд другої гармоніки  $S_2[n]$  дискретизованого вторинного струму  $i_2[n]$  з появою насичення магнітопроводу значно зростає у порівнянні з відповідною щільністю амплітуд «правдивого» дискретизованого приведенного первинного струму  $i_1'[n]$ . Цю характеристику можна також використати як додатковий показник того, що магнітопровід ТС ввійшов у стан насичення. Спектральна щільність амплітуд другої гармоніки  $S_2[n]$  дискретизованого приведенного первинного струму  $i_1'[n]$  після виникнення насичення не рівна нулю через дискретизацію струму, а також через те, що аперіодична складова в пер-

винному струмі дещо спотворює симетрію миттєвого струму відповідно до пікових значень на періодах основної частоти.

Випадок рис. 2 *г* відрізняється від двох попередніх тим, що для розрахунку вторинного струму  $i_2[n]$  ТС враховувався вплив залишкової індукції в його магнітопроводі (70 % від максимально можливої залишкової індукції для розглядаємих характеристик магнітопроводу ТС), а саме: гірший випадок, коли знак залишкової індукції співпадає зі знаком аперіодичної складової струму КЗ. У такому випадку вторинний струм  $i_2[n]$  значно спотворюється на першому періоді основної частоти після виникнення КЗ і відповідно значення спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$  є значно меншими, ніж у попередніх двох випадках (ефект фільтра аперіодичної складової).

Спільною ознакою для випадків рис. 2 *в* та *г* є те, що спектральна щільність амплітуд другої гармоніки  $S_2[n]$  на відміну від випадків рис. 2 *а*, де взагалі відсутнє насичення, та рис. 2 *б*, де ТС входить у насичення на другому періоді основної частоти після виникнення КЗ, що ця амплітуда після входження магнітопроводу ТС в насичення спочатку має зростаючий характер, що свідчить про глибоке насичення магнітопроводу ТС, а потім – спадаючий характер.

Для випадку рис. 2 *б* значення спектральної щільності амплітуд другої гармоніки вторинного струму спочатку падає до нуля; це свідчить про те, що магнітопровід ТС ще не ввійшов у режим насичення на першому періоді основної частоти, а потім різко зростає і в подальшому має спадаючий характер, що свідчить про м'яке насичення магнітопроводу ТС.

Аналізовані випадки і всі розраховані дані рис. 2 отримані практично за ідеальних умов, які в реальних енергосистемах, як правило, не існують. На практиці струми містять спектри вищих гармонік та високочастотних завад. З одного боку, відповідно до експериментальних результатів досліджень праці [5 та ін.] ТС є фільтром шуму в діапазоні високих частот, проте лінії зв'язку між выводами ТС та аналого-цифровою частиною (див. рис. 1) на високочастотних підстанціях можуть сягати декількох сот метрів і не виключено, що електромагнітні поля на таких підстанціях можуть створювати електричні наведення в лініях зв'язку, і струм, який потрапляє на вхід аналогового фільтра, містить високочастотний шум. У зв'язку з цим на рис. 3 зображені ті ж самі модельовані випадки тільки з урахуванням впливу високочастотного шуму, а саме кожний випадок містить зашумлені миттєві приведені первинний  $i_1'[n]$  та вторинний  $i_2[n]$  струми, відфільтровані фільтром Баттерворса четвертого порядку та дискретизовані АЦП струми, приведені первинний  $i_1'[n]$  та вторинний  $i_2[n]$  струми, а також розраховані відповідні значення спектральних щільностей амплітуд  $S_0[n]$  та  $S_2[n]$ . Шум, який накладався на миттєві приведені первинний та вторинний струми – білий Гаусів шум, з показником відношення сигналу до шуму (signal to noise ratio, SNR), рівним 15 дБ, що є достатньо високим показником зашумленості.

Порівняння результатів розрахунку спектральних щільностей амплітуд аперіодичної складової та другої гармоніки для обох струмів без врахування впливу шуму (рис. 2) та з урахуванням шуму (рис. 3) дає можливість чітко стверджувати, що внаслідок фільтрації результати розрахунків практично ідентичні в усіх випадках для спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$ . У разі порівняння результатів розрахунків ідентичних випадків без врахування впливу шуму та з урахуванням шуму для спектральної щільності амплітуд другої гармоніки  $S_2[n]$  спостерігались незначні відхилення в розрахунках, максимальне з яких не перевищувало 0,5 %. Такий аналіз та порівняння дають можливість стверджувати, що якщо аналізувати комплексно перехідні процеси в ПВК струму і здійснювати обробку результатів вимірювання методом дискретних перетворень Фур'є, то в результаті можна отримати достатньо стійкі до високочастотного шуму інформативні показники спектральних характеристик, які можна і доцільно використовувати в інформаційно-вимірювальних системах, системах релейного захисту, автоматики та керування для розширення їх функціональних можливостей, підвищення технічної досконалості та ефективності функціонування.



Рис. 3

Зокрема, для прикладу, сам критерій різкого перерозподілу потужності сигналу між гармоніками можна використати для розробки методів виявлення КЗ. Тут найбільш ефективним інформативним показником для цієї мети може бути спектральна щільність амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$ . Ефективність цього показника полягає в тому, що для його розрахунку необхідна мінімальна кількість обчислювальних затрат, оскільки відсутня необхідність визначення комплексних значень, а у разі правильної реалізації алгоритму кожне вікно даних потребуватиме тільки двох обчислювальних операцій (додавання та віднімання). Подібний інформативний показник запропоновано та досліджено в праці [6], проте в ній показником виявлення КЗ є лише сума вибірок струму за період основної частоти, що практично є пропорційним до спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової. Також слід зазначити, що в енергосистемах присутні інші експлуатаційні режими, наприклад різка зміна навантаження в енергосистемі, що відповідно викликати також різкий перерозподіл потужності між гармоніками на початкових етапах. Такі вибірки в свою чергу потраплятимуть у вікно даних для розрахунку чи то спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$ , чи то показника, запропонованого в праці [6], тому стверджувати про самодостатність запропонованих показників для виявлення КЗ у мережах не слід говорити. Але використання таких показників, як додаткових критеріїв для достовірного висновку чи відбулось КЗ в енергосистемі, чи ні – заслуговують на увагу.

Другий напрямок, де можна використати досліджені спектральні характеристики, серед яких відмітимо значення, характер та періоди зміни спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової  $S_0[n]$  та другої гармоніки  $S_2[n]$ , це системи, які потребують точної фіксації періодів насичення магнітопроводів ТС. Описані процеси мають всі шанси стати основою розробки досконалого методу виявлення початку входження та періодів насичення магнітопроводу ТС. Ця задача актуальна для багатьох типів релейних захистів, а також для методів корекції вторинного струму ТС за умов насичення їх магнітопроводу.

**Висновки.** Встановлено, що з появою насичення магнітопроводу ТС значно зростає спектральна щільність амплітуд другої гармоніки вихідного сигналу ПВК струму порівняно з такою ж властивістю його вхідного сигналу, що може бути використано як показник моніторингу режиму роботи ТС, а саме: входження його магнітопроводу в режим насичення.

Встановлено, що початок насичення магнітопроводу ТС ПВК аперіодичною складовою струму КЗ супроводжується різким перерозподілом потужності струму між гармоніками вторинного струму ТС ПВК і значною відмінністю спектральних щільностей амплітуд аперіодичної складової та другої гармоніки приведенного первинного та вторинного струмів ТС ПВК.

Показано, що спектральна щільність амплітуд аперіодичної складової вторинного струму ТС ПВК у разі насичення нею його магнітопроводу близька до нуля. Це свідчить про те, що в цьому режимі ТС є фільтром аперіодичної складової струму.

На основі порівняння результатів розрахунків спектральної щільності амплітуд аперіодичної складової та другої гармоніки вхідного та вихідного сигналів ПВК струму показано, що цифрова обробка дискретизованого вторинного струму ТС ПВК струму методом ДПФ забезпечує одержання стійких до високочастотних завад спектральних характеристик ПВК, які можуть бути використані в інформаційно-вимірвальних системах у разі розв'язання низки актуальних задач електроенергетики (підвищення точності вимірювання струмів у перехідних режимах ЕЕС, вдосконалення релейного захисту, моніторингу режимів роботи ТС та ін.).

1. Танкевич Є.М. Первинні вимірвальні канали систем комплексної автоматизації електроенергетичних об'єктів : дис. ... докт. техн. наук : 05.14.02 / Інститут електродинаміки НАНУ, Київ. 2004. 445 с.
2. Подгорный Э.В. Техническое приложение и развитие теории электромагнитных процессов для построения быстродействующих релейных защит: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Новочеркасск. 1989. 454 с.
3. Phadke A. G., Thorp J. S. Computer relaying for power systems. Second edition. N-Y.: Wiley. 2009. 326 p.
4. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Паньків В.І., Танкевич Є.М. Математична модель трансформатора струму на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайла-Атертона. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 1–8.
5. Elhaffar A., Elkalashy N. I., Lehtonen M. Experimental investigations on multi-end fault location system based on current traveling waves. 2007 IEEE Lausanne power tech conference. Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007. P. 1141–1146.
6. Pradhan A. K., Routray A., Mohanty S. R. A mowing sum approach for fault detection of power systems. *Electric Power Components and Systems*. 2006. Vol. 34. P. 385–399.

УДК 621.314.224

**В.І. Паньків**, асп., **Е.Н. Танкевич**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

### **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ**

*Рассчитаны электромагнитные процессы в трансформаторах тока высоковольтных первичных измерительных каналов (ПВК) тока в переходных режимах работы энергосистемы и исследованы спектральные характеристики ПВК тока с помощью дискретных преобразований Фурье. Указано на возможность и целесообразность использования спектральных характеристик ПВК для решения ряда задач электроэнергетики. Библи. 6, рис. 3.*

**Ключевые слова:** трансформатор тока, насыщение, спектральный анализ, преобразование Фурье.

**V.I. Pankiv, E.M. Tankevych**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

### **SPECTRAL ANALYSIS OF THE PRIMARY MEASURING CHANNELS OF HIGH-VOLTAGE POWER SYSTEM SUBSTATIONS**

*The electromagnetic processes in the current transformer of the high-voltage primary measuring current channel in the transient conditions of the power system are calculated and the spectral analysis of the current channel is conducted*

using the discrete Fourier transform. It has been suggested and recommended to use the spectral analysis of current channel to solve a number of problems of electric power engineering. References 6, figures 3.

**Key words:** current transformer, saturation, spectral analysis, Fourier transform.

1. Tankevich E. M. Primary measuring channels of electric power systems objects complex automation: diss. .... doct. tech. sciences: 05.14.02 / Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. 2004. 445 p. (Ukr)
2. Podgorny E.V. Technical application and development of the theory of electromagnetic processes for the construction of high-speed relay protection: dis. ... doct. tech. Sciences: 05.14.02 / Novocherkassk. 1989. 454 p. (Rus)
3. Phadke A. G., Thorp J. S. Computer relaying for power systems. Second edition. N-Y.: Willey. 2009. 326 p. (Eng)
4. Stognii B.S., Sopel 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. P. 58–65. (Ukr)
5. Elhaffar A., Elkalashy N. I., Lehtonen M. Experimental investigations on multi-end fault location system based on current traveling waves. 2007 IEEE *Lausanne power tech conference*. Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007. P. 1141–1146. (Eng)
6. Pradhan A. K., Routray A., Mohanty S. R. A mowing sum approach for fault detection of power systems. *Electric Power Components and Systems*. 2006. Vol. 34. P. 385–399. (Eng)

Надійшла 01.08.2018

Received 01.08.2018

УДК 621.31

## ОЦІНКА ОБМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ В ТРИФАЗНИХ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВРАХУВАННЯМ НОРМОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**С.П. Денисюк**, докт. техн. наук, **Д.С. Горенко**, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,  
вул. Борщагівська, 115, Київ, 03056, Україна  
e-mail: spdens@ukr.net, gorenko.darya@gmail.com

*Проведено аналіз взаємного впливу елементів у перетині трифазної три- та чотирипровідної локальної системи електропостачання (ЛСЕ). Проаналізовано діючі нормативні документи, що регламентують електромагнітну сумісність електротехнічних засобів та систем як в Україні, так і за кордоном. Запропоновано використовувати частку взаємного впливу елементів фаз для оцінки обмінних процесів у перетині трифазної ЛСЕ. Представлено послідовність визначення частки взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ три- та чотирипровідного виконання. Побудовано графічні залежності зміни частки взаємного впливу та коефіцієнтів несиметрії у разі різного рівня несиметрії для три- та чотирипровідних трифазних ЛСЕ. Наведено аналітичні вирази зв'язку коефіцієнтів несиметрії за зворотною та нульовою послідовностями від частки взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ. Аргументовано можливість нормування частки взаємного впливу як додаткового показника обмінних процесів у трифазних ЛСЕ. Бібл. 17, рис. 3, таблиця.*

**Ключові слова:** трифазні системи електроживлення, показники якості електроенергії, електромагнітна сумісність, обмінна потужність.

**Вступ.** Впровадження технологій Smart Grid передбачає модернізацію мереж електропостачання, використання інформаційних та комунікаційних мереж і технологій для збору інформації про генерацію та споживання, що дасть змогу автоматично підвищити ефективність, надійність, економічність, а також стійкість виробництва та розподілу електроенергії [1]. У локальних системах електропостачання (ЛСЕ) за рахунок широкого використання пристроїв силової електроніки для узгодження великої кількості різнотипних джерел розосередженої генерації виникає проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) [2, 3-5]. Показниками, що характеризують рівні ЕМС, є показники якості електроенергії (ПЯЕ). Частина ПЯЕ характеризує впливи в усталеному режимі роботи обладнання. До них належать відхилення напруги та частоти, спотворення синусоїдальності форми кривої напруги, несиметрія і коли-