

## ◆ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ◆

УДК 621.314.222.68

### ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ВИНИКНЕННЯ ТА ЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ІНДУКЦІЇ В МАГНІТОПРОВОДАХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**Б.С. Стогній**, акад. НАН України, **М.Ф. Сопель**, докт. техн. наук, **В.І. Паньків**, інж.,  
**Є.М. Танкевич**, докт. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
 e-mail: regina@elan-ua.net

*Досліджено механізми виникнення залишкової індукції та явища саморозмагнічування магнітопроводів трансформаторів струму при симетричних та асиметричних струмах короткого замикання в електричних мережах високої напруги. Встановлено фактори, що визначають виникнення та значення залишкової індукції в трансформаторах струму енергосистем. Виконано кількісне оцінювання впливу залишкової індукції (для різних її значень) на похибки трансформатора струму в усталеному та перехідному режимах роботи за різних значень первинного струму та вторинного навантаження трансформатора. Обґрунтовано необхідність розробки методики обчислення залишкової індукції в магнітопроводах трансформаторів струму з урахуванням факторів, що впливають на її значення. Бібл. 14, рис. 8, таблиця.*

**Ключові слова:** трансформатор струму, залишкова індукція, магнітопровід, саморозмагнічування, струм короткого замикання.

**Вступ.** Залишкова індукція  $B_r$  в магнітних осердях трансформаторів струму (ТС) є одним з основних та важливих параметрів, що впливають на метрологічні характеристики ТС. Саме тому ця величина входить до числа вхідних даних при кількісному аналізі електромагнітних процесів в ТС, а дослідженням цього явища присвячено значну кількість праць, зокрема [1-8, 11, 12, 15]. Це вагомий фактор, який слід враховувати при дослідженнях і розробках засобів у сфері вимірювання струмів електроенергетичних об'єктів (ЕЕО), обліку кількості електроенергії, налагоджень релейного захисту і автоматики, особливо у зв'язку з постійною вимогою підвищення швидкодії більшості з цих засобів.

**Мета.** Визначення можливих найбільш ймовірних та критичних значень залишкової індукції в ТС, які експлуатуються в електричних мережах, для забезпечення можливості подальшого їх врахування при розв'язанні ряду задач, зокрема в розрахунках перехідних процесів у ТС та оцінюванні впливу їх похибок, зумовлених залишковою індукцією, на засоби вимірювання, захисту, автоматичного керування та обліку електроенергії.

**Як і на що може впливати залишкова індукція в осерді ТС в умовах експлуатації ТС на ЕЕО.** Залишкова індукція може спричинити вагомий вплив на точність вимірювання струму в нормальних режимах роботи ЕЕО. Робоча індукція при трансформації первинного струму в нормальних режимах експлуатації визначається за такою схемою:

$$i_1 \rightarrow F_1 = i_1 w_1 \rightarrow \Phi_1 \rightarrow \begin{cases} e_1 = -d\psi/dt; \\ e_2 = -d\psi/dt \rightarrow i_2 \rightarrow F_2 = i_2 w_2 \rightarrow \Phi_2, \end{cases}$$

тобто при проходженні через ТС первинний струм  $i_1$  за законом повного струму створює магніторушійну силу  $F_1$ , яка за законом Ома для магнітного кола створює магнітний потік  $\Phi_1$ . Цей потік охоплює як первинні витки  $w_1$ , так і вторинні  $w_2$ , індукуючи в них електро-

рушійні сили  $e_1$  та  $e_2$  відповідно. При замиканні вторинної обмотки ТС на деякий опір навантаження за законом Ома по ній протікатиме струм  $i_2$ , що спричинить магніторушійну силу  $F_2$  і магнітний потік  $\Phi_2$ . При цьому магнітна індукція співпадатиме за напрямом з магнітним потоком  $\Phi_2$ , а її амплітудне значення в усталеному режимі визначатиметься таким чином:

$$B_{\max} = \frac{\Phi_2}{S} = \frac{e_2}{S \cdot w_2 \cdot \omega} = \frac{i_2 \cdot z_2}{S \cdot w_2 \cdot \omega}, \quad (1)$$

де  $S$  – поперечний переріз магнітопроводу ТС;  $z_2$  – модуль сумарного опору навантаження включно з опором вторинної обмотки.

За наявності залишкової індукції в осерді ТС нахил часткових петель гістерезису є дещо більший, ніж при її нульовому значенні (рис. 1), про що зазначалось у праці [2]. Це супроводжується зростанням струму намагнічування  $i_0(t) = H(t) \cdot l / w_1$  ( $l$  – середня лінія магні-

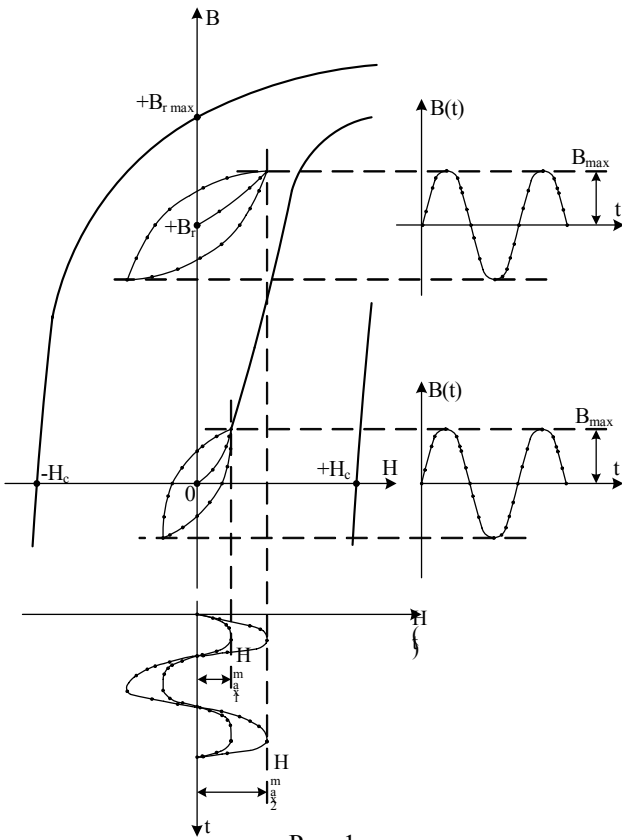


Рис. 1

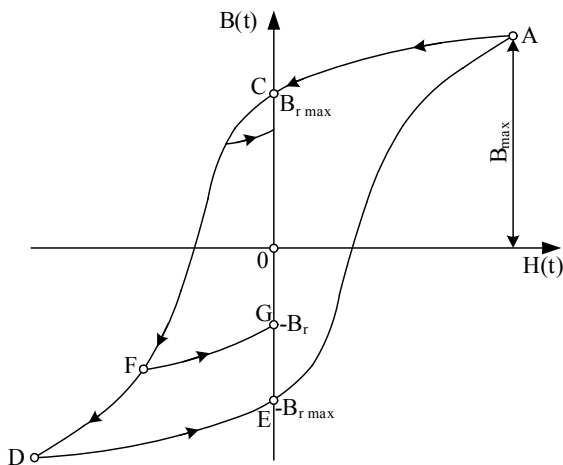


Рис. 2

топроводу ТС) і похибок ТС в усталеному режимі. Відповідність значень похибок ТС встановленим нормам у процесі їх виробництва згідно з вимогами стандарту [9] має здійснюватись при повністю розмагніченому осерді ТС.

Отже, якщо при розмагніченому осерді ( $B_r = 0$  Тл) ТС відповідає приписаному класу точності, тобто значення його струму намагнічування  $i_0(t)$  [відповідає  $H_1(t)$ ] знаходиться в допустимих межах, то за наявності залишкової індукції ( $B_r \neq 0$  Тл), при трансформації того ж первинного струму, струм намагнічування  $i_0(t)$  [відповідає  $H_2(t)$ ] матиме дещо більше значення і похибки ТС можуть перевищити встановлені для класу точності норми.

При коротких замиканнях (КЗ), коли в струмі  $i_1(t)$  відсутня аперіодична складова, що мають місце в мережах класів напруг 110...330 кВ, намагнічування магнітопроводу ТС до моменту вимкнення струму  $i_1(t)$  проходить по гістерезисній петлі з максимальним значенням індукції  $B_{\max}$  (рис. 2).

Якщо вимкнення струму проходить у момент, коли в магнітопроводі індукція максимальна, залишкова індукція характеризується точкою С, Е і значеннями, рівними ОС та ОЕ. При відключенні первинного струму в момент, що відповідає будь-якій точці відрізка АС чи ДЕ гістерезисної петлі, значення залишкової індукції в осерді ТС буде однаковим і рівним ОС (ОЕ). При відключенні усталеного КЗ у момент, відповідний точці F або будь-якій точці відрізка FG, значення залишкової індукції буде рівним ОG. Таким чином, при відключенні симетричного струму КЗ індукція в осерді ТС спадає до значення залишкової індукції  $0 - B_r$ .

У випадку, коли в струмі КЗ присутня аперіодична складова, поведінка індукції в магнітопроводі ТС матиме зовсім інший характер (рис. 3).

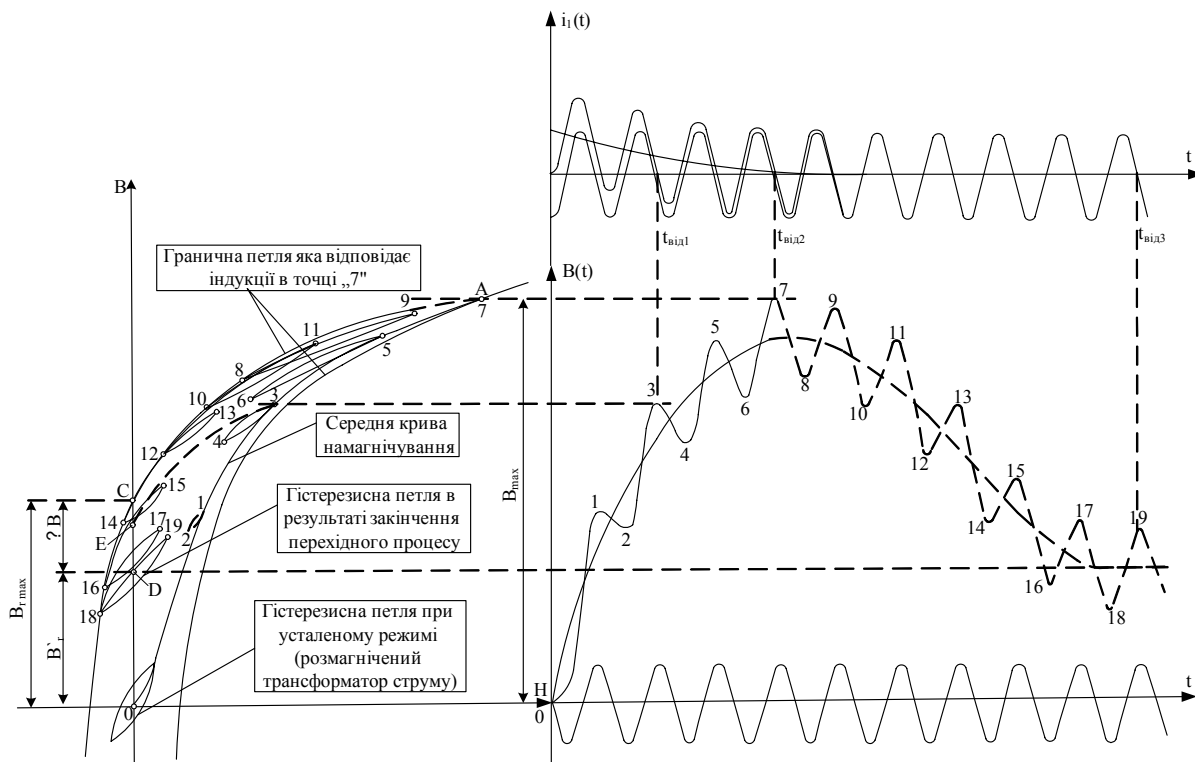


Рис. 3

### Струм КЗ

$$i_1(t) = I_{1m} (\cos(\varphi_{кз}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{кз})), \quad (2)$$

де  $I_{1m}$  – амплітуда струму;  $T_1$  – стала часу затухання;  $\varphi_{кз}$  – початкова фаза, зумовить зростання індукції в магнітопроводі до значення  $B_{max}$  (точка 7), що далі почне зменшуватись з еквівалентною сталою часу  $T'$  вторинного контура ТС, змінюючись весь час циклічно до значення  $B'_r$ . Значення  $B'_r$  значною мірою залежать від амплітуди періодичної складової струму КЗ.

Вимкнення струмів КЗ може здійснюватись без витримки часу в перші ж моменти виникнення пошкодження або з витримкою часу для забезпечення селективності спрацювання. Як у першому, так і в другому випадках для уникнення стійкої дуги вимкнення струму відбувається при проходженні вторинного струму через нуль.

Індукція в магнітопроводі досягає свого максимального значення протягом 0,5...3,0 періодів [2]. Орієнтовно в цьому інтервалі спрацьовує струмова відсічка. На рис. 3 приблизно це моменти відключення  $t_{від1}$  та  $t_{від2}$ . Причому, якщо вимкнення струму відбудеться в момент часу  $t_{від2}$ , зміна індукції після вимкнення пройде по частковій гістерезисній петлі А-С, яка відповідає максимальній індукції  $B_{max}$ . При вимкненні пошкодження в момент часу  $t_{від1}$  індукція в осерді ТС спадатиме по траєкторії 3-Е до значення, що відображене відрізком 0Е.

За наявності в релейних захистах витримок часу (наприклад  $t_{від3}$ ) більших, ніж стала часу затухання вторинного контура  $T'$ , індукція змінюватиметься навколо точки D залишкової індукції  $B'_r$ . При цьому зниження залишкової індукції  $\Delta B$  залежить від амплітуди змінної індукції, значення якої визначається амплітудою періодичної складової струму КЗ.

Похибки ТС при перехідних процесах за наявності залишкової індукції досліджувались за допомогою експериментальної схеми в праці [6], математичного моделювання – в працях [4, 14]. Як видно з цих праць, наявність залишкової індукції при певних збігах обставин (при од-

накових знаках залишкової індукції та струму пошкодження) сильно впливає на трансформацію струму, амплітуда та форма якого різко змінюються із-за насичення магнітопроводу. При виникненні пошкодження, яке супроводжується несиметричним струмом, важливим фактором, який впливає на величину залишкової індукції, є момент відключення струму КЗ.

Вплив залишкової індукції на похибки ТС накладає додаткові вимоги до виконання техніки вимірювання, релейних захистів, автоматики та керування ЕЕО. У випадку диференціальних захистів залишкову індукцію вважають основною причиною неправильної дії експлуатованих захистів [8].

**Саморозмагнічування трансформаторів струму.** Явище і можливість саморозмагнічування ТС досліджувались у працях [2, 3, 7]. Дослідженнями [2] встановлено, що залишкова індукція в осерді ТС, після вмикання первинного струму основної частоти, зменшувалась протягом чотирьох–п'яти періодів до деякого значення, що надалі залишалось незмінним. У праці [7] експериментальними дослідженнями було встановлено, що за відсутності в кривій  $H = f(t)$  від'ємних півхвиль розмагнічування не відбувається. І навіть наявність таких півхвиль є недостатньою умовою для саморозмагнічування, оскільки під дією періодичної складової індукції розмагнічування проходить лише до певного рівня, який залежить від її амплітуди, що підтверджує поданий у праці [2] висновок.

У праці [3] на основі порівняння експериментально визначених похибок ряду двох типів ТС для вимірювань з розмагніченими, згідно з вимогами стандарту [9], магнітопроводами і похибок ТС з максимальною індукцією насичення осердь, спричиненою протіканням струму КЗ, зроблено висновок про можливість виходу похибок ТС з класу точності після протікання струмів КЗ. Там же зазначено, що час розмагнічування ТС для вимірювань визначається величиною первинного струму, потужністю вторинного навантаження, конструктивними параметрами і характеристиками електромагнітної системи ТС.

Залишкова індукція, яка утворилась внаслідок вимкнення пошкодження, як свідчать праці [1, 2, 6-8, 11], може зберігатись невизначено довго. Для перевірки і уточнення зроблених у цих працях висновків авторами на прикладі ТС типу ТФНК-330 виконано імітаційне моделювання роботи ТС і визначення його похибок в усталених і перехідних режимах енергосистеми за різних значень залишкової індукції в магнітопроводі, значень первинного струму та вторинного навантаження. Для цього використано розроблену в програмному середовищі MatLab Simulink модель ТС, побудовану на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона з деякою модифікацією [10]. Зазначимо, що перевірка розробленої гістерезисної моделі на точність відображення процесу розмагнічування магнітопроводу не здійснювалась, і тому при тривалому моделюванні (дослідженні впливу залишкової індукції та розмагнічування магнітопроводу в нормальному режимі) можливі певні неточності. Проте при аналізі швидкоплинних перехідних процесів вона досить точно відображає перехідний процес, що підтверджено експериментальною перевіркою [10]. Використання цієї моделі прийнято для відображення основних тенденцій впливу залишкової індукції в нормальних та перехідних процесах, які протікають в ТС. Для більш точного дослідження слід використовувати модель, побудовану на основі теорії Прейзаха [13], яка дає змогу врахувати історію процесів намагнічування, але є ще складнішою у своїй реалізації.

Досліджуваний ТС мав такі параметри: номінальний первинний струм  $I_{1н} = 2000$  А; номінальний вторинний струм  $I_{2н} = 1$  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: обмотки, призначеної для вимірювання  $Z_{2н} = 30$  Ом з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_{2н} = 0,8$ ; обмотки, призначеної для захисту  $Z_{2н} = 40$  Ом з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_{2н} = 0,8$ .

Визначались похибки – повна та струмова:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (w_2 i_2(t) - i_1(t))^2 dt}, \%; \quad \Delta I = 100 \frac{|w_2 I_2 - I_1|}{I_1}, \%$$

Моделювання впливу залишкової індукції в нормальному режимі роботи виконувалось при значеннях залишкової індукції в магнітопроводі ТС, рівних 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,84 Тл, з фіксацією значень повної похибки трансформації первинного струму в моменти часу 1 хв (рис. 4а, 5а, 6а) та 3 хв (рис. 4б, 5б, 6б) після вмикання первинного струму, рівного 1; 5; 20; 50; 100 і 120 % від номінального його значення та значень вторинного навантаження 0,25 · Z<sub>2н</sub> (рис. 6); 0,5 · Z<sub>2н</sub> (рис. 5) та Z<sub>2н</sub> (рис. 4).

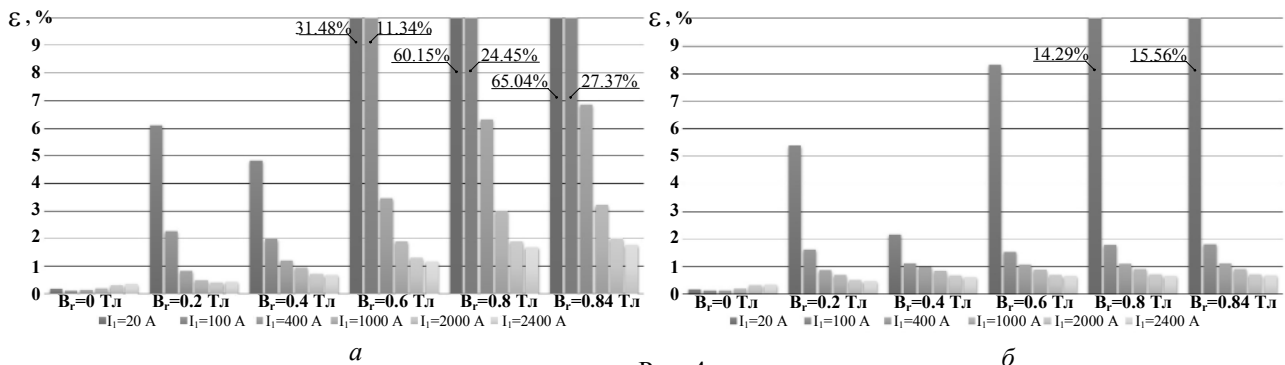


Рис. 4

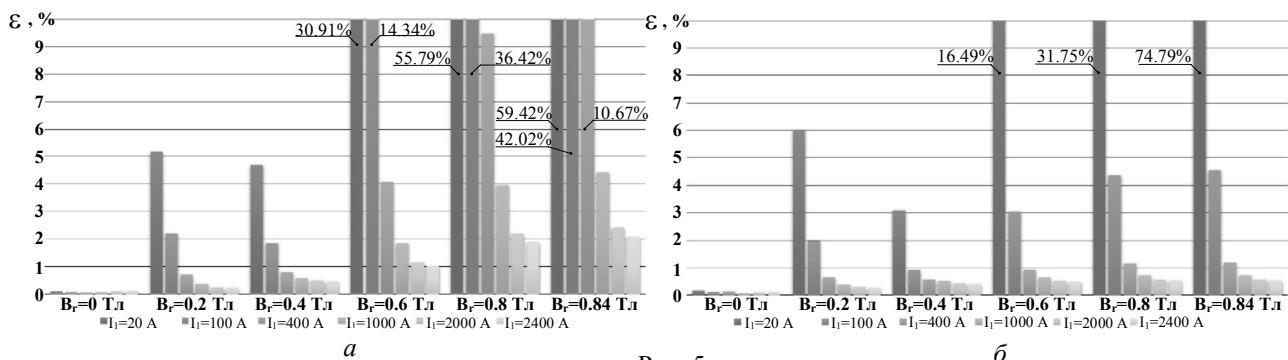


Рис. 5

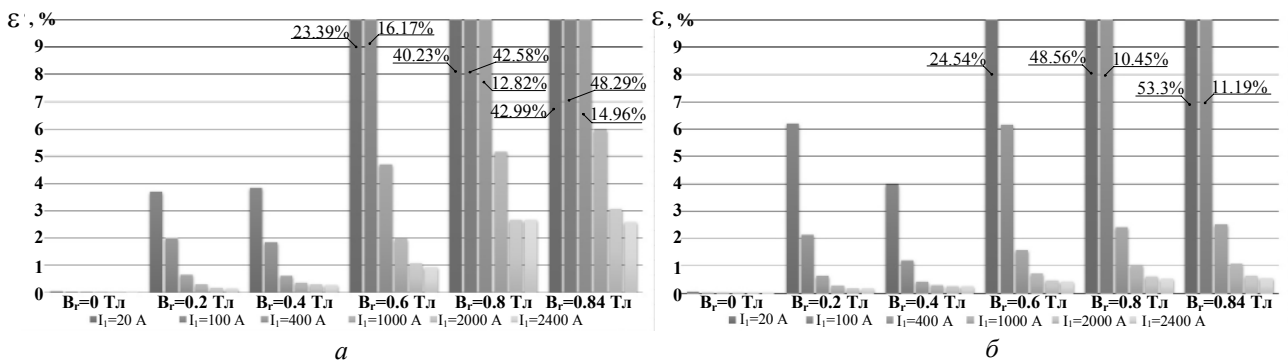


Рис. 6

З рис. 1-3 видно, що чим більше значення залишкової індукції в магнітопроводі ТС, тим більше значення похибки фіксувалось в моменти часу, що розглядалися. Чим більше значення струму протікає первинною мережею, тим швидше відбувається розмагнічування магнітопроводу та відновлюється точність трансформації первинного струму. Оскільки, як відомо з практики, високовольтні мережі в переважній більшості експлуатуються з меншим, ніж номінальне завантаженням, то можна припустити, що в такому випадку розмагнічування магнітопроводів ТС відбувається повільніше і ТС на таких лініях мають підвищені похибки. Зменшення вторинного навантаження ТС сприяє зменшенню його похибок, але збільшує час розмагнічування магнітопроводу ТС.

Слід зазначити, що час фіксації повної похибки 1 та 3 хв вибрані виходячи з того, що моделювання (розв'язання складної системи диференціально-інтегральних рівнянь) здійснювалось з досить малим значенням розрахункового кроку (для прикладу, 3 хв розрахункового часу займають 3-4 год реального часу моделювання, тривалість якого визначається значеннями вхідних початкових даних: залишковою індукцією, вторинним навантаженням ТС, діючим значенням первинного струму). При тривалому моделюванні з деяким значенням залишкової індукції повна похибка досягала певного усталеного значення, яке більше, ніж у випадку відсутності залишкової індукції, і практично вже не зменшувалось. Швидкість досягнення усталеного значення повної похибки ТС визначається зазначеними вище значеннями вхідних початкових даних.

Моделювання електромагнітних перехідних процесів у ТС ТФКН-330 здійснювалось при різних значеннях залишкової індукції в магнітопроводі ТС ( $B_r = 0, \pm B_{r\max}$ , де  $B_{r\max} = 0,84$  Тл) та амплітуді періодичної складової струму КЗ (2)  $I_{1m} = 2 \cdot I_{1n}$  у момент виникнення пошкодження  $\varphi_{кз} = 0^\circ$ , сталій часу первинного кола  $T_1 = 0,1$  с з номінальним активним вторинним навантаженням  $Z_2 = R_{2\text{обм}} + \cos \varphi_2 \cdot Z_{2н} = 8,2 + 0,8 \cdot 40 = 40,2$  Ом (рис. 7).

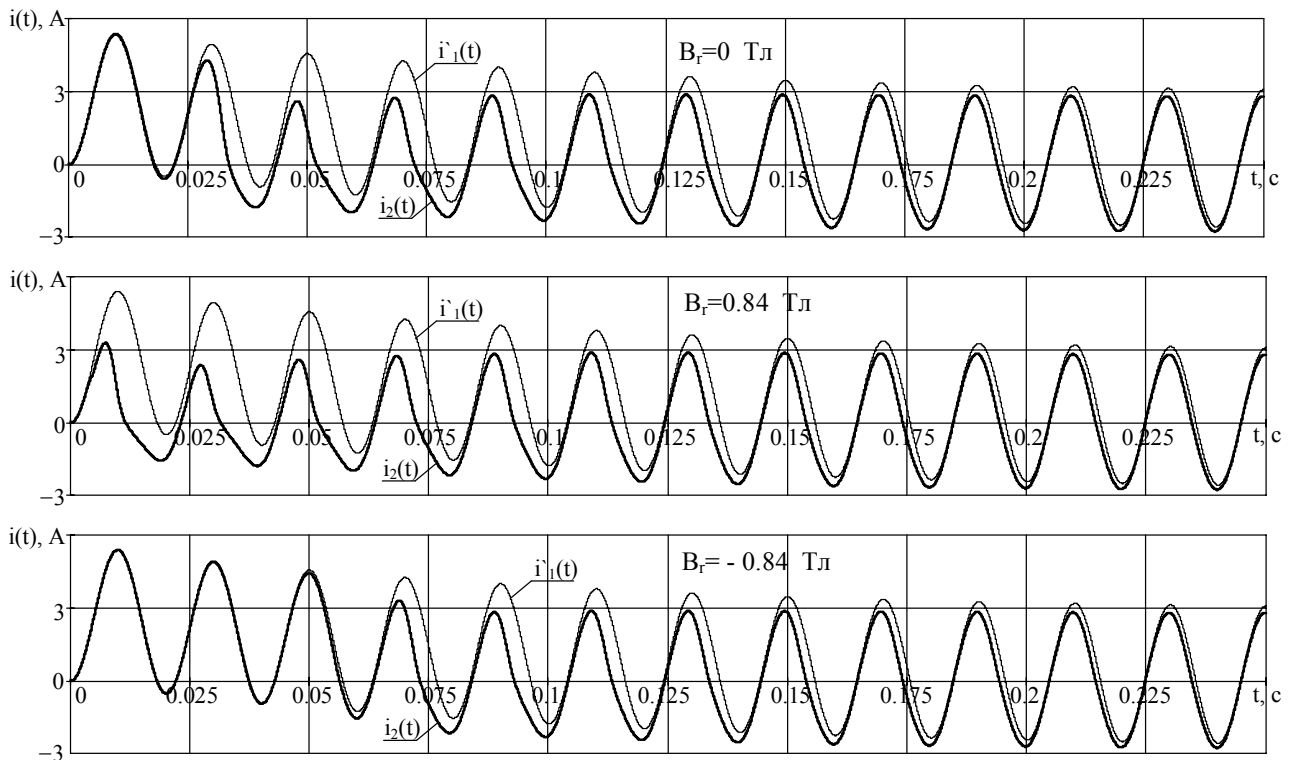


Рис. 7

З рис. 7 видно, що наявність залишкової індукції може як покращувати, так і погіршувати трансформацію первинного струму. Якщо залишкова індукція в магнітопроводі має протилежний знак до полярності струму КЗ в енергосистемі, то це значно покращує трансформацію первинного струму на перших періодах перехідного процесу в порівнянні з випадком її відсутності. У випадку, коли полярність залишкової індукції співпадає з полярністю струму КЗ, спостерігається значне насичення, починаючи з першого періоду. Для більшої наочності діючі значення первинного та вторинного струмів, повна та струмова похибки ТС у перші періоди після початку пошкодження наведено в таблиці.

Слід зазначити, що граничні значення індукції приймалися для більш ілюстративного відображення її впливу на трансформацію первинного струму при перехідних процесах.

**Визначення залишкової індукції в магнітопроводах ТС.** Найбільш цікавою і важливою в цьому аспекті є праця [1], де більш як зі ста ТС, які експлуатувались в електричних мережах класів напруг від 10 до 330 кВ, були зняті значення фактичної залишкової індукції.

В результаті цих експериментальних досліджень було встановлено, що залишкова індукція присутня в усіх ТС, і її значення коливалось від 30 до 88 % від максимально можливого.

$I'_1, A$		Період						
		1	2	3	4	5	6	7
		3,2	2,87	2,62	2,44	2,31	2,22	2,16
$B_r = 0$ Тл	$I_2, A$	3,13	1,83	1,31	1,45	1,6	1,72	1,81
	$\Delta I, \%$	2,36	36,2	50,23	40,52	30,85	22,52	16,08
	$\varepsilon, \%$	3,89	77,01	107,2	98,79	87,7	75,84	64,5
$B_r = 0,84$ Тл	$I_2, A$	1,06	1,17	1,31	1,45	1,6	1,72	1,81
	$\Delta I, \%$	67,05	59,23	50,25	40,52	30,85	22,52	16,08
	$\varepsilon, \%$	110,3	112	107,3	98,79	87,7	75,84	64,5
$B_r = -0,84$ Тл	$I_2, A$	3,18	2,83	2,48	1,63	1,6	1,72	1,81
	$\Delta I, \%$	0,71	1,56	5,64	33,28	30,79	22,52	16,08
	$\varepsilon, \%$	1,04	2,37	14,5	83,91	87,55	75,83	64,5

У цій же праці запропоновано методику визначення залишкової індукції, проте вона є неточною і складною у використанні. Неточність пов'язана з тим, що в ній залишкову індукцію описують формулою  $B_r = B_{ran} + B_{rпер}$ , де  $B_{ran} = B_a(t_p)$ , функція  $B_a(t) = B'_r + (B_{rmax} - B'_r)e^{-t/T'}$  – емпірична формула, в основу якої покладені певні припущення. Значення  $B_r$  досить суттєво залежить від сталої часу вторинного контура  $T'$ , визначення якої базується на апроксимації області розмагнічування прямою лінією, в результаті чого можливі суттєві похибки у визначенні цієї складової. Всі ці припущення значною мірою зумовлюють похибки особливо на першому десятку періодів.

Складність методики полягає в необхідності визначення експериментальних даних, серед яких максимальне значення залишкової індукції  $B_{rmax}$  та дві додаткові функції

$$B_{rmaxпер*} = f(B_{maxпер*}), B_{ан*}^{ycm} = f(B_{maxпер*}),$$

методологія визначення яких описана в цій же праці.

Зазначені аспекти обмежують використання цієї методики. У зв'язку з цим постає питання щодо розробки методики визначення залишкової індукції в ТС з використанням сучасних комп'ютерних моделей ТС, застосування якої дасть змогу оцінити наявність ймовірної залишкової індукції, яка є в магнітопроводі ТС, з метою подальшого використання цієї важливої вихідної інформації при розв'язанні багатьох важливих задач вимірювання в електроенергетиці.

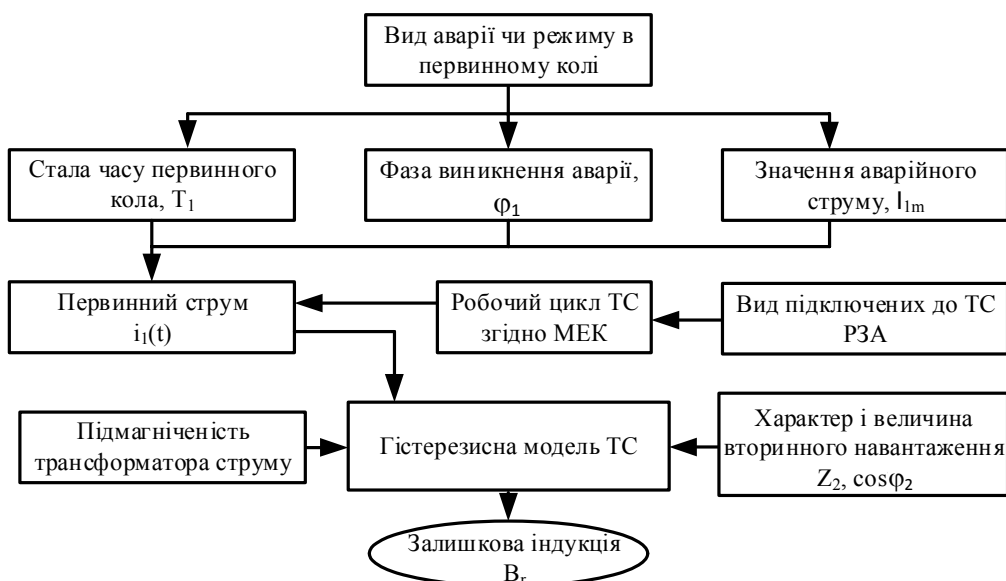


Рис. 8

Згідно з викладеними вище міркуваннями про причини виникнення залишкової індукції, така методика повинна враховувати наступні фактори та їх взаємозв'язки (рис. 8).

**Висновок.** При дослідженні впливу залишкової індукції на поведінку ТС доцільно виходити з наступних положень:

- залишкова індукція має місце практично в усіх магнітопроводах ТС, що експлуатуються в електричних мережах, і може зберігатись в них протягом тривалого часу;
- значення залишкової індукції може знаходитись у досить широких межах – практично від нуля до максимально можливої залишкової індукції  $B_{r,max}$ , що відповідає граничній петлі гістерезису, а ймовірність її різних значень суттєво залежить від умов експлуатації ТС.

Кількісне дослідження впливу залишкової індукції на похибки ТС за різних значень струму первинної мережі та вторинного навантаження ТС (246 випадків моделювання) підтверджує, що похибки ТС за наявності залишкової індукції в магнітопроводі завжди перевищують значення похибки у випадку її відсутності.

Зображена на рис. 8 сукупність факторів є основою для розробки методики визначення залишкової індукції. Її використання дасть змогу з високою точністю оцінювати наявність і можливе значення залишкової індукції в магнітопроводах ТС в умовах експлуатації.

1. *Баев А.В.* Остаточная индукция в трансформаторах тока релейной защиты // *Электричество*. – 1971. – № 7. – С. 4–9.
2. *Поташев И.П.* Остаточная индукция в трансформаторах тока // *Вестник электропромышленности*. – 1937. – № 3. – С. 16–22.
3. *Раскулов Р.* Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания // *Новости электротехники*. – 2005. – Вып. 32. – № 2. – С. 114–116.
4. *Сирота И.М.* Переходные режимы работы трансформатора тока. – К.: Изд-во АН УССР, 1961. – 192 с.
5. *Стогний Б.С.* Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
6. *Стогний Б.С., Степанов А.В.* Методика определений погрешностей трансформатора тока с учетом остаточной индукции при переходных процессах в первичной цепи // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1974. – № 8. – С. 823–828.
7. *Стогний Б.С., Степанов А.В.* О возможности саморозмагничивания трансформаторов тока в переходных режимах с остаточной индукцией // *Проблемы технической электродинамики. Республиканский межведомственный сборник*. – К.: Наук. думка. – 1973. – Вып. 43. – С. 28–33.
8. *Стогний Б.С.* О характере влияния остаточной индукции на работу трансформатора тока. – К.: Труды ИЭД АН УССР, 1963. – Вып. 20. – С. 44–59.
9. *ДСТУ ГОСТ 7746-2003.* Трансформатори струму. Загальні технічні умови. – [Чинний від 07.01.2003]. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 30 с. – (Національний стандарт України).
10. *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, № 1. – P. 57–61.
11. *Bruce R.G., Wright A.* Remanent flux in current-transformer cores // *Proceedings IEE*. – 1966. – Vol. 113, №5. – P. 915–920.
12. *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, № 4. – P. 1266–1233.
13. *Mayergoyz I.* Mathematical models of hysteresis and their application. – USA: Elsevier, 2003. – 472 p. – ISBN: 0-12-480873-5. – ISSN: – 1567-2131.
14. *Stognii B.S., Pankiv V.I., Tankevich E.M.* Iterative calculation of electromagnetic processes in the current transformer by approximated magnetization curve // *IEEE International conference on "Intelligent energy and power systems"*, (June 02-06, 2014, Kyiv); National Technical University of Ukraine "KPI", 2014. – С. 149–152.
15. *Wiszniewski A.* Przekładniki w elektroenergetyce. – Warszawa: WNT, 1982. – 302 s.

УДК 621.314.222.68

**Б.С. Стогний**, акад. НАН України, **М.Ф. Сопель**, докт. техн. наук, **В.И. Паньків**, инж., **Е.Н. Танкевич**, докт. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Факторы, определяющие возникновение и значение остаточной индукции в сердечниках трансформаторов тока в условиях эксплуатации**

Целью работы является обобщение и расширение знаний об остаточной индукции в сердечниках трансформаторов тока как одного из важных параметров, влияющих на его метрологические характеристики. Исследованы механизмы возникновения остаточной индукции и явления саморозмагничивания сердечников транс-



форматоров тока при симметричных и асимметричных токах короткого замыкания электрических сетей высокого напряжения; установлены факторы, определяющие значение остаточной индукции; исследованы как и на что она может влиять в условиях эксплуатации. С использованием разработанной в программной среде MatLab Simulink модели трансформатора тока, построенной на основе теории ферромагнитного гистерезиса Джэйлса-Атертона, выполнено моделирование электромагнитных процессов в трансформаторе тока типа ТФКН-330 в нормальном и переходном режимах работы линий электропередачи. Для нескольких значений первичного тока и вторичной нагрузки трансформатора тока выполнено количественное оценивание влияния остаточной индукции (различных ее значений) на погрешности трансформаторов тока, имеющие место через одну и три минуты расчетного времени после начала моделирования. На основе анализа результатов проведенного исследования обоснована необходимость разработки методики определения значений остаточной индукции в трансформаторах тока с использованием их современных компьютерных моделей, внедрение которой в практику эксплуатации позволит учитывать влияние остаточной индукции на результаты решения ряда важных задач измерений и защиты в электроэнергетике. Библ. 14, рис. 8, таблица.

**Ключевые слова:** трансформатор тока, остаточная индукция, сердечник, саморазмагничивание, ток короткого замыкания.

**B.S. Stognii, M.F. Sopol, V.I. Pankiv, E.M. Tankevych**

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

**Factors of determining the origin and amount of residual induction in the iron core of current transformers in operation**

*The aim is to generalize and increase knowledge of the remanence in the core of current transformers as one of the important parameters that affect its metrological characteristics. The mechanisms of occurrence of residual induction and magnetic phenomena of demagnetization of CT at symmetric and asymmetric fault current of high voltage electrical networks are investigated; factors that determine the value of the residual induction are showed; explored how and what it can influence in operation. Using the MatLab Simulink software environment developed the model of current transformer, based on the theory of Jiles-Atherton ferromagnetic hysteresis, done modeling of electromagnetic processes in current transformers of type TFKN-330 in normal and transient condition. For several values of primary current and the secondary load of current transformer performed a quantitative assessment of the impact of residual induction (its different values on current transformer errors that occur at one and three minutes after the estimated time of the simulation). Based on the analysis of the investigation results, showed the need to develop methods for determining the values of remanence in the current transformer core using their advanced computer models, the implementation of which in practice allow us to take into account the effect of the residual induction on results of a number important problems of measurement and protection in the power system. References 14, figures 8, table.*

**Key words:** current transformer, residual induction, magnetic core, demagnetization, fault current.

Надійшла 29.07.2015

Received 29.07.2015

УДК 621.316

## **ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗЕРВІВ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЇХНЬОГО ВПЛИВУ НА НАПРУГУ В МЕРЕЖІ**

**О.С. Яндутьський**, докт. техн. наук, **А.А. Марченко**, канд. техн. наук, **А.Б. Нестерко**, **Г.О. Труніна**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна,  
e-mail: a\_trunina@ukr.net

*Розглянуто підхід до визначення максимальної величини резерву активної потужності джерела розосередженого генерування, яку можливо передати в розподільну електричну мережу, не порушуючи допустимі межі напруги у системі. Запропонований підхід базується на аналізі рівнів зміни та чутливості напруги у вузлах розподільної мережі. Допустиме значення активної потужності резерву джерела розосередженого генерування визначається з урахуванням величини реактивної потужності, яка використовується для регулювання напруги в мережі. Запропонований підхід дає можливість уникнути проблеми перевищення допустимих меж напруги у вузлах системи при передачі по ній активної потужності резерву джерела розосередженого генерування. Бібл. 7, рис. 3, табл. 2.*