

УДК: 62-50

О. Б. Мокін¹
 Б. І. Мокін¹
 Я. В. Хом'юк¹
 О. М. Кривоніс¹

НОВІ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ В ДВОКАСКАДНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ СТРУМУ

Вінницький національний технічний університет

Виходячи з фізики процесів, що відбуваються у двокаскадних трансформаторах струму, запропоновано нові моделі цих процесів і показано, що загальноприйнята заступна схема трансформатора цього класу не може використовуватись для розрахунків його режимів в широкому діапазоні змін вимірюваного струму.

Ключові слова: двокаскадний трансформатор струму, загальноприйнята заступна схема, нові моделі процесів, особливості характеристики «вхід-вихід».

Вихідні передумови і постановка завдань дослідження

В роботах [1, 2] показано, що в системах релейного захисту лінії електропередачі з напругою, вищою 330 кВ, однокаскадні трансформатори струму, що мають лише один магнітопровід та дві

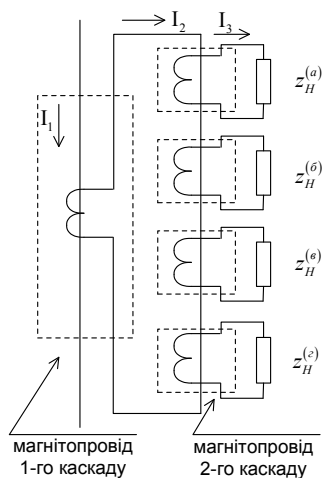


Рис. 1. Принципіальна схема двокаскадного трансформатора струму

обмотки, використовувати недоцільно, оскільки їх габарити у цьому випадку, як показують розрахунки, перевищуватимуть розумні межі. А тому промисловістю для вимірювання струмів у таких лініях випускаються двокаскадні трансформатори струму, принципіальна схема яких, взята нами з роботи [2, рис. 23-19], зображена на рис. 1.

Як бачимо, двокаскадні трансформатори струму мають два окремих магнітопроводи і чотири обмотки і являють собою, фактично, симбіоз двох однокаскадних трансформаторів струму, первинною обмоткою одного з яких є лінія електропередачі, струм якої I_1 вимірюється, а первинна обмотка другого послідовно з'єднана з вторинною обмоткою першого зі струмом I_2 .

Аналіз режимів роботи двокаскадних трансформаторів струму здійснено в роботі [3], а на особливості їх роботи в перехідних режимах звернено увагу в роботі [4]. В роботі авторів [5] показано, що стандартні методи аналізу режимів роботи однокаскадних трансформаторів струму приводять до результатів, неадекватних

реальним процесам в них, і запропоновано новий підхід до побудови математичних моделей цих режимів, оснований на аналізі безпосередньо електромагнітних процесів в трансформаторах струму. Завдяки цьому підходу в роботі [5] побудовані математичні моделі, за допомогою яких отримано реальну характеристику «вхід-вихід» однокаскадного трансформатора струму, тобто, залежність $I_2 = f_1(I_1)$.

У цій роботі авторами буде показано — і це буде *першим завданням дослідження*, що запропонована у роботах інших авторів, процитованих вище, заступна схема двокаскадного трансформатора струму, приведена, наприклад, на рис. 23-19 у роботі [2] і повторена у нашій роботі на рис. 2, оскільки на неї доведеться надалі посилається, в разі її використання в розрахунках режимів не

приводить до отримання результатів, придатних для практичного застосування.

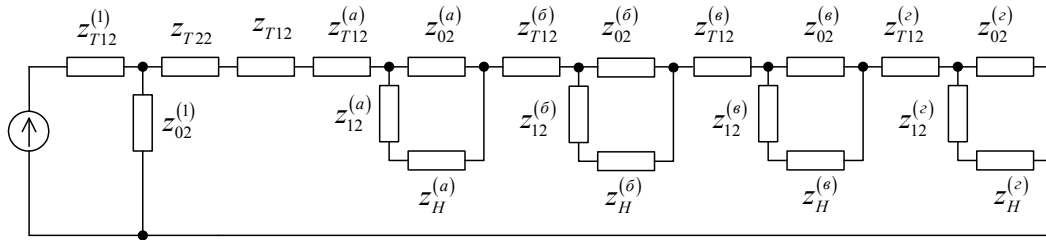


Рис. 2. Заступна схема двокаскадного трансформатора струму, що використовується в існуючій методиці розрахунку його режимів роботи

Крім того, у цій роботі запропоновано на аналіз режимів роботи двокаскадних трансформаторів струму розповсюдити той же підхід, оснований на безпосередньому аналізі електромагнітних процесів, який ми застосували при синтезі математичних моделей однокаскадного трансформатора в роботі [5] — і це буде *другим завданням дослідження*. В результаті застосування цього підходу отримані нові моделі режимів і характеристика «вхід-вихід» $I_3 = f_2(I_1)$ двокаскадного трансформатора струму, які є адекватними процесам в ньому і які мають суттєві відмінності від відомих моделей і характеристик цього класу електричних апаратів.

Розв'язання поставлених завдань

Як і у нашій роботі [5], почнемо з посилання на рис. 25-14 з роботи [2], на якому показана графічна інтерпретація струмів, електрорушійних сил і потітокзчеплення, що мають місце в однокаскадному трансформаторі струму в усталеному режимі його функціонування. Оскільки ці графіки будуть справедливими і для першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, то приводимо їх і у цій нашій роботі на рис. 3 — це верхні чотири графіки, на яких:

i_1 — струм у первинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_1 витків, тобто, той струм, який потрібно виміряти;

i_2^* — струм i_2 у вихідній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_2 витків, приведений до первинної обмотки цього каскаду для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку зі струмом i_1 ;

Ψ_{12} — потітокзчеплення, яке дорівнює кількості витків первинної обмотки першого каскаду, помноженій на результуючий магнітний потік Φ , що їх перетинає, тобто

$$\Psi_{12} = w_1 \Phi_{12}, \quad (1)$$

де

$$\Phi_{12} = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (2)$$

а Φ_1, Φ_2 — протилежно спрямовані магнітні потоки, створювані струмами i_1, i_2 у магнітопроводі першого каскаду двокаскадного трансформатора струму;

e_2 — електрорушійна сила, створювана у вторинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму результуючим магнітним потоком Φ_{12} у магнітопроводі першого каскаду у відповідності з законом електромагнітної індукції, тобто

$$e_2 = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = w_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt}; \quad (3)$$

γ_1, γ_2 — відповідно, кут, за якого магнітопровід першого каскаду двокаскадного трансформатора струму входить в режим насичення та виходить з нього.

А на нижніх трьох графіках, приведених на рис. 3, уже авторами додана графічна інтерпретація потітокзчеплення, е.р.с. та струму, що мають місце у другому каскаді двокаскадного трансформатора струму, при цьому:

i_3^* — струм i_3 у вихідній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_4 витків, приведений до первинної обмотки першого каскаду двокаскадного трансформатора струму для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку зі струмами i_1, i_2^* ;

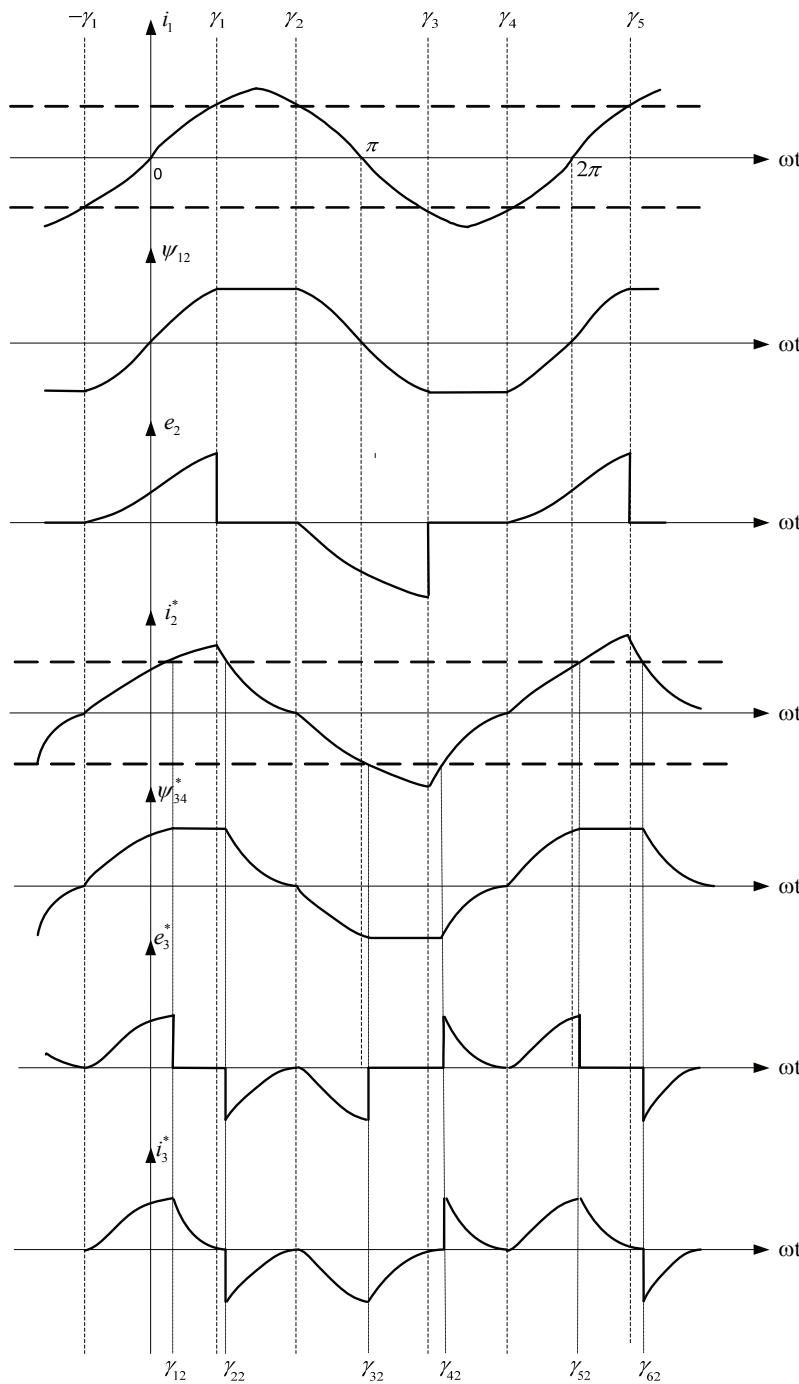


Рис. 3. Графіки струмів i_1 , i_2^* , i_3^* , потокозчеплень Ψ_{12} , Ψ_{34}^* та е.р.с. e_2 , e_3^* , що характеризують роботу двокаскадного трансформатора струму

$$i_2(t) = i_2^{(1)}(t)[1(t) - 1(t-t_1)] + i_{2a}^{(2)}(t-t_1)[1(t-t_1) - 1(t-t_2)] + i_2^{(3)}(t-t_2)[1(t-t_2) - 1(t-t_3)] + i_{2a}^{(4)}(t-t_3)[1(t-t_3) - 1(t-t_4)] + i_2^{(5)}(t-t_4)[1(t-t_4) - 1(t-t_4)], \quad (7)$$

де

$$i_2^{(1)}(t) = \frac{e_2(t)}{z_2} = \frac{e_2(t_1)}{2z_2} \left(\frac{\cos \omega t + \operatorname{ctg} \gamma_1 \sin \omega t}{\cos \gamma_1} \right) e^{-\gamma_1 \operatorname{ctg} \gamma_1 + (\omega \operatorname{ctg} \gamma_1)t}, \quad (8)$$

$$i_{2a}^{(2)}(t) = \frac{e_2(t_1)}{z_2} e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}; \quad (9)$$

Ψ_{34}^* — потокозчеплення Ψ_{34} , яке дорівнює кількості витків w_3 первинної обмотки другого каскаду, помноженій на результуючий магнітний потік Φ_{34} , що їх перетинає, тобто

$$\Psi_{34}^* = w_3 \Phi_{34}, \quad (4)$$

де $\Phi_{34} = \Phi_3 - \Phi_4$, (5)

а Φ_3, Φ_4 — протилежно спрямовані магнітні потоки, створювані струмами i_2, i_3 у магнітопроводі другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, приведені до первинної обмотки першого каскаду для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку з потокозчепленням Ψ_{12} ;

e_3^* — електрорушійна сила e_3 , створювана у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму результуючим магнітним потоком Φ_{34} у магнітопроводі другого каскаду у відповідності з законом електромагнітної індукції, тобто

$$e_3^* = \frac{d\Psi_{34}^*}{dt} = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt}; \quad (6)$$

γ_{12}, γ_{22} — відповідно, кут, при якому магнітопровід другого каскаду двокаскадного трансформатора струму входить в режим насичення та виходить з нього.

У роботі [5] отримано математичну модель струму i_2 у вторинній обмотці трансформатора струму у вигляді

$$i_2^{(3)}(t) = \frac{e_2(t)}{z_2} = \frac{e_2(t_3)}{z_2} \left(\frac{\cos \omega t - \operatorname{ctg} \gamma_2 \sin \omega t}{\cos \gamma_3 - \operatorname{ctg} \gamma_2 \sin \gamma_3} \right) e^{\gamma_3 \operatorname{ctg} \gamma_2 - (\omega \operatorname{ctg} \gamma_2)t}, \quad (10)$$

$$i_{2a}^{(4)}(t) = \frac{e_2(t_3)}{z_2} e^{-\frac{t-t_3}{T_2}}; \quad (11)$$

$$i_2^{(5)}(t) = \frac{e_2(t)}{z_2} = \frac{e_2(t_5)}{z_2} \left(\frac{\cos \omega t - \operatorname{ctg} \gamma_4 \sin \omega t}{\cos \gamma_5 - \operatorname{ctg} \gamma_4 \sin \gamma_5} \right) e^{\gamma_5 \operatorname{ctg} \gamma_4 - (\omega \operatorname{ctg} \gamma_4)t}; \quad (12)$$

$$\begin{cases} 1(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } \forall t \in [0, \infty); \\ 0 & \text{для } \forall t < 0; \end{cases} \\ 1(t - \tau) = \begin{cases} 1 & \text{для } \forall t \in [\tau, \infty); \\ 0 & \text{для } \forall t < \tau; \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

$$t_i = \frac{\gamma_i}{\omega}; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (14)$$

Графік струму $i_2(t)$, отриманого згідно з моделлю (7) і приведеного до первинної обмотки у вигляді $i_2^*(t)$ для зіставлення з струмом $i_1(t)$ на їх порівнювальних графіках, зображений на рис. 3. З цього графіка та з формул (8)—(12), які його описують, видно, що на трьох відрізках осі абсцис, на яких цей струм описується виразами (8), (10), (12), він має синусоїдально-косинусоїдальний характер, а на двох відрізках цієї осі, на яких цей струм описується виразами (9), (11), він має експоненціальний характер. А це означає, що такий самий характер на усіх вище згаданих відрізках осі абсцис буде мати і магнітний потік Φ_{34} у магнітопроводі другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, створюваний струмом $i_2(t)$, що протікає і по вихідній обмотці першого каскаду трансформатора струму і по вхідній обмотці його другого каскаду, оскільки

$$\Phi_{34} = k_\Phi i_2, \quad (15)$$

де k_Φ — тангенс кута нахилу характеристики намагнічування $\Phi = \Phi(i)$ магнітопроводу другого каскаду двокаскадного трансформатора струму. А тому, згідно з виразом (4) такий самий характер буде мати і потокозчеплення Ψ_{34} , графік якого на рис. 3 для можливості зіставлення з графіком потокозчеплення Ψ_{12} першого каскаду теж представлений як графік потокозчеплення Ψ_{34}^* , приведеного до первинної обмотки двокаскадного трансформатора струму. На графіку Ψ_{34}^* бачимо, що над відрізками $[\gamma_{11}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$, $[\gamma_{52}, \gamma_{62}]$ осі абсцис, у зв'язку з тим, що магнітний потік Φ_{34} згідно з характеристикою намагнічування $\Phi = \Phi(i)$ магнітопроводу другого каскаду на цих відрізках входить в зону насичення, ми маємо ділянки, на яких

$$\begin{cases} \Psi_{34} = \text{const}; \\ \frac{d\Psi_{34}}{dt} = 0, \end{cases} \quad (16)$$

а тому, згідно з виразом (6) і е.р.с e_3 , що наводиться у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, на цих відрізках осі абсцис буде дорівнювати нулю, як це показано на рис. 3 на графіку цієї е.р.с, котра для графічного зіставлення з е.р.с e_2 першого каскаду зображена на цьому графіку теж у вигляді е.р.с e_3^* , приведенної до першого каскаду. А, як ми показали у роботі [5], на відрізках осі абсцис, на яких маємо рівною нулю е.р.с., струм в обмотці, до якої прикладена ця е.р.с (у нашому випадку е.р.с e_3) буде або експоненціально спадати — як на відрізках $[\gamma_{11}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{52}, \gamma_{62}]$, або експоненціально наростати — як на відрізку $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$. Це показано на рис. 3 на графіку струму i_3 , що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, і який для забезпечення можливості зіставлення з графіками інших

струмів у обмотках цього трансформатора, на графіку зображений у приведеному до першого каскаду вигляді i_3^* .

Аналізуючи цей графік, бачимо, що в межах одного періоду з кутом від 0 до 2π лише в діапазоні кутів $[0, \gamma_{12}]$, $[\gamma_2, \gamma_{32}]$, $[\gamma_4, 2\pi]$ струм i_3 , повторюючи е.р.с., змінюється за синусоїдальним законом, а в діапазоні усіх інших кутів — $[\gamma_{12}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{22}, \gamma_2]$, $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$, $[\gamma_{42}, \gamma_4]$ — цей струм змінюється за експоненціальним законом, а тому він не може розраховуватись з використанням заступної схеми двокаскадного трансформатора струму у вигляді, показаному на рис. 2, на якому ми повторюємо заступну схему, приведену в основоположній роботі [2], адже лише при синусоїдальному струмові $i = I_m \sin \omega t$ у вихідній обмотці з індуктивністю L та активним опором r матимемо балансове рівняння прикладеної напруги $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$ у вигляді

$$\begin{aligned} r i + L \frac{di}{dt} &= r I_m \sin \omega t + L \frac{d}{dt}(I_m \sin \omega t) = (r I_m) \sin \omega t + (\omega L I_m) \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \phi) = \\ &= U_m (\sin \omega t \cos \phi + \cos \omega t \sin \phi) = (U_m \cos \phi) \sin \omega t + (U_m \sin \phi) \cos \omega t, \end{aligned} \quad (17)$$

з якого випливає, що

$$U_m \cos \phi = r I_m; \quad (18)$$

$$U_m \sin \phi = \omega L I_m \quad (19)$$

та, що після піднесення до квадрата рівнянь (18) і (19) та їх додавання

$$U_m^2 = (r^2 + (\omega L)^2) I_m^2 \quad (20)$$

або

$$U_m^2 = z^2 I_m^2, \quad (21)$$

де

$$z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \quad (22)$$

повний опір обмотки синусоїдальному струму.

І саме цей повний опір z використовується у відомій заступній схемі двокаскадного трансформатора струму, приведений на рис. 2, визначений за виразом (22) для кожного елемента принципіальної схеми цього трансформатора, показаної на рис.1, що є справедливим лише при синусоїдальному характері струму в цих елементах. А як показано вище, такий характер струм має лише в трьох діапазонах, прив'язаних до осі абсцис, а в чотирьох діапазонах струм має експоненціальний характер, для якого поняття кругової частоти ω не існує в принципі, тому і заступну схему, приведену на рис. 2, яка оперує з повними опороми z елементів принципіальної схеми в усьому кутовому діапазоні $[0, 2\pi]$, для розрахунку значень цього струму не можна використовувати теж в принципі. Цим висновком ми і завершимо розв'язання першого з поставлених задач цього дослідження.

А далі перейдемо до розв'язання другого з поставлених завдань дослідження, тобто, застосувавши метод, розроблений нами для визначення струму i_2 у вторинній обмотці однокаскадного трансформатора струму в роботі [5], покажемо як, застосовуючи цей метод, розраховувати струм i_3 у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.

Як на підставі виразів (7)—(14) за співвідношенням

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2(t))^2 dt} \quad (23)$$

розрахувати дійсне значення I_2 змінного струму з періодом T у вторинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, коректно об'єднуючи в межах періоду T усі часткові формули (8)—(12), отримані нами для різних часових проміжків, упродовж яких магнітопровід першого каскаду знаходився або в ненасиченому стані, або в стані насичення, ми показали в попередній роботі [5], тож на цьому етапі розрахунків зупинитись не будемо і вважатимемо, що і математичну модель для струму $i_2(t)$ у вигляді виразу (7) з деталізацією за допомогою виразів (8)—(12) і

характеристику «вхід-вихід» першого каскаду у вигляді залежності $I_2 = f_1(I_1)$ ми вже маємо. Орієнтовний вигляд їх графіків нами показаний на рис. 3 для моделі $i_2(t)$ та на рис. 4 для залежності $I_2 = f_1(I_1)$. А тому далі, відштовхнувшись від моделі струму $i_2(t)$, займемось виключно лише створенням математичної моделі для струму $i_3(t)$ та отриманням характеристики «вхід-вихід» $I_3 = f_2(I_1)$ двокаскадного трансформатора струму в цілому.

Якщо ми знаємо струм $i_2(t)$ у первинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму та характеристику намагнічування $\Phi_{34} = \Phi_{34}(i_2)$ магнітопроводу другого каскаду, то, скориставшись виразом (4), можемо визначити спочатку потокозчеплення Ψ_{34} , графік якого показано на рис. 3, а потім, скориставшись виразом (6), і е.р.с. e_3 , графік якої теж показано на рис. 3. І якщо на графіку е.р.с. e_2 вторинної обмотки першого каскаду трансформатора струму ми мали лише 5 кутових діапазонів зміни характеру залежності, то, як бачимо, на графіку е.р.с. e_3 вторинної обмотки другого каскаду трансформатора струму ми маємо уже 7 кутових діапазонів зміни характеру залежності $[0, \gamma_{12}], [\gamma_{12}, \gamma_{22}], [\gamma_{22}, \gamma_2], [\gamma_2, \gamma_{32}], [\gamma_{32}, \gamma_{42}], [\gamma_{42}, \gamma_4], [\gamma_4, 2\pi]$ в такому порядку ми їх і пронумеруємо, використовуючи верхні індекси від одиниці до семи при формуванні складових струму i_3 в кожному з цих кутових діапазонів, тобто, позначаючи ці складові як $i_3^{(1)}, i_3^{(2)}, i_3^{(3)}, i_3^{(4)}, i_3^{(5)}, i_3^{(6)}, i_3^{(7)}$. Тож з урахуванням цих позначень математичну модель для струму $i_3(t)$ за аналогією з математичною моделлю для струму $i_2(t)$, що задана виразом (7), з урахуванням властивостей одиничної функції $1(t)$, заданих виразами (13), та аналогів позначень, заданих виразом (14), можна записати так:

$$\begin{aligned} i_3(t) = & i_3^{(1)}(t)[1(t) - 1(t - t_{12})] + i_3^{(2)}(t - t_{12})[1(t - t_{12}) - 1(t - t_{22})] + i_3^{(3)}(t - t_{22})[1(t - t_{22}) - \\ & - 1(t - t_2)] + i_3^{(4)}(t - t_2)[1(t - t_2) - 1(t - t_{32})] + i_3^{(5)}(t - t_{32})[1(t - t_{32}) - 1(t - t_{42})] + \\ & + i_3^{(6)}(t - t_{42})[1(t - t_{42}) - 1(t - t_4)] + i_3^{(7)}(t - t_4)[1(t - t_4) - 1(t - t_{52})]. \end{aligned} \quad (24)$$

Звичайно, для того, щоб за допомогою цієї моделі можна було здійснювати аналіз процесів у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму її необхідно ідентифікувати, тобто, конкретизувати вирази для усіх струмових складових, що входять до структури математичної моделі (24). І почнемо процес ідентифікації цієї математичної моделі з конкретизації складової $i_3^{(1)}(t)$, яка має синусоїдальний характер, а тому для неї справедливим є вираз (22). Очевидно, що згідно з законами електротехніки

$$i_3^{(1)}(t) = \frac{e_3^{(1)}(t)}{z_3}, \quad (25)$$

де $e_3^{(1)}(t)$ — це е.р.с., що наводиться у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму на часовому відрізку $[0, t_{12}]$ і має синусоїдальний характер, а

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + (\omega L_3)^2} \quad (26)$$

повний опір цієї обмотки, і при цьому до r_3 включений і активний опір навантаження на цю обмотку, а до L_3 включена і індуктивність навантаження на цю обмотку.

Оскільки ми уже знаємо струм $i_2(t)$ у первинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, який одночасно є знайденим нами на етапі аналізу процесів у першому каскаді струмом у вихідній обмотці першого каскаду, то, використовуючи вирази (6) і (15), матимемо:

$$e_3^{(1)}(t) = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt} = w_4 k_\Phi \frac{di_2^{(1)}}{dt}. \quad (27)$$

Підставляючи вирази (26) і (27) у вираз (25) та обрізаючи результат на границях відрізу часу

$[0, t_{12}]$, отримуємо складову струму $i_3(t)$ на цьому відрізку у вигляді $i_3^{(1)}(t)$, яка на правій границі відрізка матиме числове значення $i_3^{(1)}(t_{12})$, а тому експоненціальна складова $i_3^{(2)}(t)$ струму $i_3(t)$ на відрізку часу $[t_{12}, t_{22}]$ буде мати вигляд

$$i_3^{(2)}(t) = i_3^{(1)}(t_{12})e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (28)$$

де стала часу T_3 вторинної обмотки другого каскаду двокаскадного трансформатора струму знаходиться з виразу

$$T_3 = \frac{L_3}{r_3}. \quad (29)$$

На третьому відрізку часу $[t_{22}, t_2]$ складова $i_3^{(3)}(t)$ струму $i_3(t)$ теж є згасальною експонентою, але для визначення її стартового значення $i_3^{(3)}(t_{22})$ необхідно спочатку, скориставшись виразом (27), який після підстановки в нього із виразу (9) експоненціальної складової $i_{2a}^{(2)}(t)$ набуде вигляду

$$e_3^{(3)}(t) = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt} = w_4 k_\Phi \frac{di_{2a}^{(2)}}{dt} = -\frac{w_4 k_\Phi}{z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}, \quad (30)$$

визначити числове значення е.р.с. $e_3^{(3)}(t)$ в точці $t = t_{22}$, що дорівнюватиме

$$e_3^{(3)}(t_{22}) = -\frac{w_4 k_\Phi}{z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t_{22}-t_1}{T_2}}, \quad (31)$$

а потім розділити отримане значення е.р.с. $e_3^{(3)}(t_{22})$ на сумарний активний опір r_3 контуру вихідної обмотки другого каскаду двокаскадного трансформатора струму. Тож в результаті математичної моделі структурної складової $i_3^{(3)}(t)$ на відрізку часу $[t_{22}, t_2]$ отримаємо у вигляді

$$i_3^{(3)}(t) = i_3^{(3)}(t_{22}) e^{-\frac{t-t_{22}}{T_3}} = \frac{e_3^{(3)}(t_{22})}{r_3} = -\frac{w_4 k_\Phi}{r_3 z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t_{22}-t_1}{T_2}} e^{-\frac{t-t_{22}}{T_3}}. \quad (32)$$

Із графіка струму $i_3(t)$, приведенного на рис. 3, легко бачити, що складова $i_3^{(4)}(t)$ цього струму на четвертому відрізку часу $[t_2, t_{32}]$ є «перевернутою і зсунутою на відрізок часу $t_1 + t_2$ » складовою $i_3^{(1)}(t)$, уже визначеною нами раніше, а тому маємо право записати

$$i_3^{(4)}(t) = -i_3^{(1)}(t - t_1 - t_2), \quad (33)$$

складова $i_3^{(5)}(t)$ цього струму на п'ятому відрізку часу $[t_{32}, t_{42}]$ є «перевернутою і зсунутою на відрізок часу $t_{32} - t_{12}$ » складовою $i_3^{(2)}(t)$, уже визначеною нами раніше, а тому маємо право записати, що

$$i_3^{(5)}(t) = -i_3^{(2)}(t + t_{12} - t_{32}), \quad (34)$$

складова $i_3^{(6)}(t)$ цього струму на шостому відрізку часу $[t_{42}, t_4]$ є «перевернутою і зсунутою на відрізок часу $t_{42} - t_{22}$ » складовою $i_3^{(3)}(t)$, уже визначеною нами раніше, а тому маємо право записати

$$i_3^{(6)}(t) = -i_3^{(3)}(t + t_{22} - t_{42}), \quad (35)$$

а складова $i_3^{(7)}(t)$ цього струму на сьомому відрізку часу $[t_4, t_{52}]$ є лише «зсунутою на відрізок часу $t_1 + t_4$ » складовою $i_3^{(1)}(t)$, уже визначеною нами раніше, а тому маємо право записати, що

$$i_3^{(7)}(t) = i_3^{(1)}(t - t_1 - t_4). \quad (36)$$

Оскільки усі складові струму $i_3(t)$ у вихідній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму нами визначені через відповідні складові вхідного струму $i_2(t)$ цього каскаду, а він, як вихідний струм першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, нами у роботі [5] визначений як параметрично залежний від дійсного значення I_1 струму в лінії електропередачі, який вимірюється трансформатором струму, то і всі складові струму $i_3(t)$ теж є параметрично залежними від дійсного значення I_1 струму в лінії електропередачі, який вимірюється трансформатором струму, а тому в разі підстановки моделі (24), ідентифікованої виразами (25), (28), (32)—(36), у вираз

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_3(t))^2 dt}, \quad (37)$$

отримаємо залежність:

$$I_3 = f_2(I_1), \quad (38)$$

яка являтиме собою характеристику «вхід-вихід» двокаскадного трансформатора струму. Графік цієї залежності зображений на рис. 4. На цьому ж рисунку показано, що, якщо зони насичення магнітопроводів першого і другого каскадів двокаскадного трансформатора струму не співпадають, то характеристика (38) зміщуватиметься по горизонталі, займаючи, наприклад, положення характеристики $I_3 = f_2^*(I_1)$.

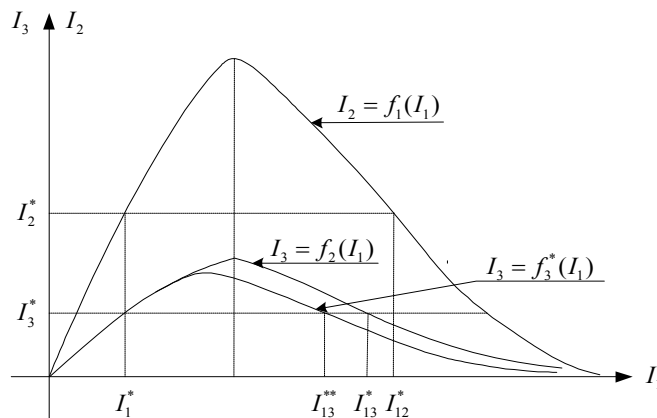


Рис. 4. Реальні характеристики «вхід-вихід» двокаскадного трансформатора струму:

$I_2 = f_1(I_1)$ — його першого каскаду; $I_3 = f_2(I_1)$ — обох його каскадів при одночасному насиченні магнітопроводів;

$I_3 = f_2^*(I_1)$ — обох його каскадів при неспівпадінні насичення магнітопроводів

Як бачимо з графіків, показаних на рис. 4, і для двокаскадних трансформаторів струму з тих же причин, які розкриті в нашій попередній роботі [5], згідно з реальною вихідною характеристикою $I_3 = f_2(I_1)$ характерним є те, що одному і тому ж дійсному значенню I_3^* його вихідного струму другого каскаду відповідають два дійсні значення I_1^*, I_{13}^* його вхідного струму, виміряти який є його функцією. Тож, як і у випадку однокаскадного трансформатора струму, розглянутого нами у роботі [5], при вимірюваннях двокаскадним трансформатором струму виникає таке ж запитання: «А як, маючи вимірне значення I_3^* , розрізнити, яке із значень I_1^*, I_{13}^* зумовило це вимірне значення?».

Наша відповідь на це запитання не відрізнятиметься від тієї, яка дана в роботі [5] — оскільки двокаскадні трансформатори струму вибираються для забезпечення вимірювань струмів в усталеному режимі роботи високовольтних ліній електропередачі без помітних похибок вимірювання, тобто, без входження в режим насичення магнітопроводів, то усім вимірним значенням I_3^* , що

мають місце в усталеному режимі роботи лінії високовольтної електропередачі, в якій встановлені ці трансформатори струму, відповідають значення I_1^* . Якщо ж у високовольтній лінії електропередачі виникло коротке замикання, яке завжди супроводжується значними струмами, через які коротко замкнута високовольтна лінія одразу ж відключається релейним захистом, то вимірюваному значенню I_3^* необхідно ставити у відповідність значення I_{13}^* .

А завершити це дослідження ми хочемо тим же закликом, який уже був виголошений в попередній роботі [5], суть якого полягає в тому, що офіційну документацію до двокаскадних трансформаторів струму обов'язково слід доповнити вихідною статичною характеристикою $I_3 = f_2(I_1)$, яку потрібно або визначити експериментально на заводі, що їх виготовляє, або розрахувати, використовуючи запропоновані нами математичні моделі.

Висновки

1. Здійснено детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються у двокаскадному трансформаторі струму, та уточнено їх характеристики.

2. Синтезовано математичну модель для оцінки струму, що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.

3. Побудовано вихідну статичну характеристику двокаскадного трансформатора струму, яка зв'язує дійсне значення струму у вторинній обмотці другого каскаду з дійсним значенням струму у первинній обмотці першого каскаду, та запропоновано увести цю характеристику в офіційну документацію, якою комплектуються двокаскадні трансформатори струму на заводах, які їх виготовляють.

4. Запропоновано спосіб зняття неоднозначності при використанні вихідної статичної характеристики двокаскадного трансформатора струму, обумовленої тим, що кожному дійсному значенню струму у вторинній обмотці другого каскаду відповідає не одне, а два дійсних значення струму у первинній обмотці першого каскаду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока / Н. И. Бачурин. — Л. : Энергия. — 1964. — 376 с.
2. Электротехнический справочник : в 3 т. Том 2. Электротехнические устройства. — 6-е изд., испр. и доп. / [В. Г. Герасимов, П. Г. Грудинский, Л. А. Жуков и др.]. — М.: Энергоиздат. — 1981 — 640 с.
3. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / В. Е. Казанский. — М. : Энергия. — 1969. — 183 с.
4. Переходные режимы работы каскадных трансформаторов тока с дополнительной ступенью / [А. Д. Дроздов, А. Н. Вищев, В. В. Могирев и др.] // Электричество. — 1973. — № 2. — С. 34—41.
5. Мокін О. Б. Уточнення характеристик процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, О. М. Кривоніс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2017. — № 4. — С. 51—57.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів

Стаття надійшла до редакції 22.09.2017

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Мокін Борис Іванович — д-р техн. наук, професор, акад. НАПН України, професор кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки та кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Хом'юк Яна Вікторівна — аспірант кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: khomiukyana@gmail.com ;

Кривоніс Олександр Михайлович — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. B. Mokin¹
B. I. Mokin¹
Y. V. Khomiuk¹
O. M. Kryvonis¹

New Models of Process Analysis in Two-Stage Current Transformers

¹Vinnitsia National Technical University

Proceeding from the physics of the processes taking place in two-stage current transformers, new models of these processes have been proposed and it is shown that the conventional equivalent circuit of transformer of this class can't be used to calculate its modes over a wide range of changes of measured current.

Keywords: two-stage current transformer, conventional equivalent circuit, new models of the processes, features of the "input-output" characteristic.

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Systems, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Mokin Borys I. — Dr. Sc. (Eng.), Academician of NAPS of Ukraine, Professor of the Chair of Renewable Energy and Transportation Systems and Electrical Systems and Professor of the Chair of Systems Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics;

Khomiuk Yana V. — Post-Graduate Student of the Chair of Systems Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: khomiukyana@gmail.com ;

Kryvonis Oleksandr M. — Post-Graduate Student Renewable Energy and Transportation Systems and electrical Systems

А. Б. Мокин¹
Б. И. Мокин¹
Я. В. Хомюк¹
О. М. Кривонис¹

Новые модели анализа процессов в двухкаскадных трансформаторах тока

¹Винницкий национальный технический университет

Исходя из физики процессов, протекающих в двухкаскадных трансформаторах тока, предложены новые модели этих процессов и показано, что общепринятая схема замещения трансформатора этого класса не может использоваться для расчетов его режимов в широком диапазоне изменений измеряемого тока.

Ключевые слова: двухкаскадный трансформатор тока, общепринятая схема замещения, новые модели процессов, особенности характеристики «вход-выход».

Мокин Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Мокин Борис Иванович — д-р техн. наук, профессор, акад. НАПН Украины, профессор кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов и кафедры системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики;

Хомюк Яна Викторовна — аспирант кафедры системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики, e-mail: khomiukyana@gmail.com ;

Кривонис Александр Михайлович — аспирант кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов