

УДК 621.314

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЧАСТИНИ ДАВАЧА СТРУМУ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ІЗ ЗАДАНИМИ КЛАСОМ ТОЧНОСТІ Й КОЕФІЦІЄНТОМ БЕЗПЕКИ ПРИБЛАДІВ ЕЛЕКТРОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

В. В. Гречко, Г. М. Варський, Є. М. Танкевич

Інститут електродинаміки Національної академії наук України

просп. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна. E-mail: varsky@ied.org.ua

Забезпечення заданого значення номінального коефіцієнта безпеки приладів при заданому класі точності давача струму сприяє поліпшенню експлуатаційних характеристик електронного трансформатора струму для вимірювання й тому є важливою та актуальною задачею при розрахунку давача. Визначено залежності мінімального значення коефіцієнта безпеки приладів давача від його основних параметрів і характеристик, що дозволяє розраховувати параметри електромагнітної системи давача. На основі використання отриманих узагальнених залежностей розроблено метод розрахунку електромагнітної системи такого давача. Правильність розрахунку параметрів давача підтверджена результатами перевірки коефіцієнта безпеки й класу точності, виготовленої за результатами розрахунку фізичної моделі давача.

Ключові слова: давач, електронний трансформатор струму, коефіцієнт безпеки приладів, аморфні й нанокристалічні сплави.

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЧАСТИ ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ЗАДАНЫМИ КЛАССОМ ТОЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТОМ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

В. В. Гречко, Г. М. Варский, Е. Н. Танкевич

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины

просп. Победы, 56, Киев, 03680, Украина. E-mail: varsky@ied.org.ua

Обеспечение заданного значения номинального коэффициента безопасности приборов при заданном классе точности датчика тока способствует улучшению эксплуатационных характеристик электронного трансформатора тока для измерения и поэтому является важной и актуальной задачей при расчете датчика. Определены зависимости минимального значения коэффициента безопасности приборов датчика от его основных параметров и характеристик, что позволяет рассчитывать параметры электромагнитной системы датчика. На основе применения полученных обобщенных зависимостей разработан метод расчета электромагнитной системы такого датчика. Правильность расчета параметров датчика подтверждена результатами испытаний коэффициента безопасности и класса точности, изготовленной по результатам расчета физической модели датчика.

Ключевые слова: датчик, электронный трансформатор тока, коэффициент безопасности приборов, аморфные и нанокристаллические сплавы.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Останнім часом у світовій електроенергетиці спостерігається швидке зростання обсягів застосування цифрових технологій для моніторингу режимних параметрів, стану електротехнічного обладнання й технологічного керування електроенергетичними об'єктами (ЕЕО), що обумовлює доцільність створення та використання первинних вимірювальних перетворювачів струму й напруги із цифровим виходом. Електронні трансформатори струму (ЕТС) є одними з таких перетворювачів [1].

ЕТС відрізняються широким діапазоном зміни вимірюваного струму, тому їх зазвичай будують двоканальними. Перший канал призначений для вимірювання, а другий – для захисту. Відповідно до цього ЕТС мають два первинних давачі струму: для вимірювання й для релейного захисту, об'єднаних у одній конструкції.

На даний час, з точки зору завадостійкості, точності й стабільності метрологічних характеристик, доцільно використовувати як давачі струму ЕТС електромагнітні трансформатори струму (ТС) [2]. Але під час протікання надструмів, які виникають унаслідок аварії в ЕЕО, постає задача захисту електронної частини ЕТС у каналі для вимірювання від дії цих стру-

мів. Для вирішення зазначеної задачі для давача ЕТС у вигляді електромагнітного ТС нормується номінальний коефіцієнт безпеки приладів [3].

За ДСТУ ІЕС 60044–1 [4] номінальний коефіцієнт безпеки приладів K_{FS} – це відношення номінального граничного первинного струму для вимірювання I_{PL} до номінального первинного струму I_{pn} трансформатора.

При досягненні первинним струмом I_p величини I_{PL} і подальшому його зростанні діюче значення вторинного струму збільшується дуже повільно завдяки насиченню осердя давача. Обмеження на заданому рівні вторинного струму давача ЕТС для вимірювання під час аварії в мережі дає змогу забезпечити простий і надійний захист електронної частини ЕТС від надструмів та запобігти збільшенню похибки ЕТС для вимірювання в післяаварійний період.

Забезпечення заданого значення номінального коефіцієнта безпеки приладів при збереженні класу точності сприяє поліпшенню експлуатаційних характеристик ЕТС для вимірювання, першою ланкою яких є давач, і тому це важлива й актуальна задача при розрахунку електромагнітної системи давача ЕТС.

Метою дослідження є розробка нового методу, який, порівняно із запропонованим у роботі [5], дозволяє більш точно визначити індукцію в осерді давача, яка відповідає мінімальному значенню коефіцієнта безпеки K_{FS} ; врахувати значення струмової й кутової похибок з метою контролю їх входження в допустимі межі; без попередніх розрахунків знаходити вид матеріалу осердя давача та його початкову магнітну проникність. Використання розробленого методу дозволить будувати давач із заданими класом точності й коефіцієнтом безпеки приладів з оптимальними з техніко-економічної точки зору параметрами електромагнітної системи давача і ЕТС у цілому.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1. *Залежність K_{FS} від параметрів і характеристик давача.* Залежність коефіцієнта безпеки приладів від основних характеристик і параметрів давача визначається співвідношеннями:

$$f_i = \frac{H \sin(\varphi_s + \psi) l_m}{N_p I_p}; \quad (1)$$

$$\delta = \frac{H \cos(\varphi_s + \psi) l_m}{N_p I_p}; \quad (2)$$

$$\psi = \psi(B); \quad (3)$$

$$B = B(H); \quad (4)$$

$$\varepsilon = \sqrt{f_i^2 + \delta^2} = H l_m / (N_p I_p); \quad (5)$$

$$I_p = \frac{4,44 B f A_c N_p K_n^2}{(1 - \varepsilon) Z_s}; \quad (6)$$

$$l_m = 0,5\pi(D_{out} + D_{in}); \quad (7)$$

$$A_c = 0,5\pi h(D_{out} - D_{in}); \quad (8)$$

$$Z_s = \sqrt{[r_{w.s} + Z_{sn} \cos \varphi_{sn}]^2 + [x_{l.s} + Z_{sn} \sin \varphi_{sn}]^2}; \quad (9)$$

$$r_{w.s} = \frac{\rho(D_{out} - D_{in} + 2h + 8A_s) N_p K_n}{A_{s.w}}; \quad (10)$$

$$x_{l.s} = 4\pi 10^{-7} f N_p^2 K_n^2 h \ln(D_{out}/D_{in}); \quad (11)$$

$$\cos \varphi_s = \frac{r_{w.s} + Z_{sn} \cos \varphi_{sn}}{Z_s}; \quad (12)$$

$$K_{FS} = \frac{I_{PL}}{I_{pn}}, \quad (13)$$

де f_i – струмова похибка, в.о.; δ – кутова похибка, рад; H – напруженість магнітного поля, А/м; ψ – кут втраг, електричних градусів; l_m – довжина середньої магнітної лінії осердя, м; N_p – кількість витків первинної обмотки; ε – повна похибка, в.о.; B – рівень індукції, Тл; $\psi = \psi(B)$ – залежність ψ від B ; $B = B(H)$ – залежність B від H ; f – частота вимірюваного струму, Гц; A_c – активна площа поперечного перерізу осердя, кв.м.; K_n – коефіцієнт трансформації; Z_s – повний опір кола

вторинного струму, до складу якого входять активний опір $r_{w.s}$, опір розсіювання $x_{l.s}$ вторинної обмотки й номінальне вторинне навантаження Z_{sn} , Ом; $\cos \varphi_s$ – коефіцієнт потужності кола вторинного струму; $\cos \varphi_{sn}$ – коефіцієнт потужності номінального вторинного навантаження; D_{out} – зовнішній діаметр осердя, м; D_{in} – внутрішній діаметр осердя, м; h – висота осердя, м; η – коефіцієнт заповнення площі поперечного перерізу осердя магнітним матеріалом; ρ – питомий опір проводу вторинної обмотки, Ом·м²/м; $A_{s.w}$ – площа поперечного перерізу проводу вторинної обмотки, м².

Номінальному первинному струму I_{pn} відповідає рівень індукції B_n і повна похибка ε_n :

$$I_{pn} = \frac{4,44 B_n f A_c N_p K_n^2}{(1 - \varepsilon_n) Z_s}. \quad (14)$$

Номінальному граничному первинному струму для вимірювання I_{PL} відповідає деякий рівень індукції B_{PL} та повна похибка $\varepsilon_c = 0,1$ в.о.:

$$I_{PL} = \frac{4,44 B_{PL} f A_c N_p K_n^2}{(1 - \varepsilon_c) Z_s}. \quad (15)$$

Підстановка (14) та (15) у (13) дає

$$K_{FS} = \frac{(1 - \varepsilon_n) B_{PL}}{(1 - \varepsilon_c) B_n}. \quad (16)$$

Підстановка (5) у (6) дає

$$I_p = \frac{4,44 B f A_c N_p K_n^2}{\left(1 - \frac{H(B) l_m}{N_p I_p}\right) Z_s}, \quad (17)$$

де $H = H(B)$ – залежність, яка є зворотною залежності $B = B(H)$.

Розв'язати (17) при $I_p = I_{pn}$ означає знайти таке $B = B_n$, за яким рівність (17) виконується. Тоді $\varepsilon_n = H(B_n) l_m / (N_p I_{pn})$.

B_{PL} визначається наступним чином.

Визначаючи I_p з (5) та з урахуванням, що при $I_p = I_{PL}$ напруженість магнітного поля $H = H_{PL}$, отримується:

$$I_{PL} = \frac{H_{PL} l_m}{N_p \varepsilon_c}. \quad (18)$$

Підстановка (18) у (13) дає

$$K_{FS} = \frac{H_{PL} l_m}{N_p \varepsilon_c I_{pn}}. \quad (19)$$

З (16) та (19) отримується рівність

$$\frac{H_{PL} l_m}{N_p \varepsilon_c I_{pn}} = \frac{(1 - \varepsilon_n) B_{PL}}{(1 - \varepsilon_c) B_n}. \quad (20)$$

Рівність (20) записується у вигляді

$$\frac{(1 - \varepsilon_n) B_{PL} N_p I_{pn}}{H_{PL} l_m B_n} = \frac{1}{\varepsilon_c} - 1. \quad (21)$$

Якщо в лівій частині (21) замість H_{PL} і B_{PL} підставити значення $H_{PL}' < H_{PL}$ і $B_{PL}' = B(H_{PL}') < B_{PL}$, то повна

похибка в правій частині (21) складе $\varepsilon_c' < \varepsilon_c$, тому $(1/\varepsilon_c' - 1) > (1/\varepsilon_c - 1)$.

Значення H_{PL} і відповідне йому B_{PL} із необхідним рівнем точності знаходиться шляхом поступового збільшення H_{PL}' і B_{PL}' , починаючи від значень, при яких $(1/\varepsilon_c' - 1) > (1/\varepsilon_c - 1)$, поки знак нерівності не зміниться на протилежний або не виконається рівність $(1/\varepsilon_c' - 1) = (1/\varepsilon_c - 1)$.

Активна площа поперечного перерізу осердя давача для вимірювання A_c розраховується наступним чином.

Для кожної кратності K номінального первинного струму ($I_p = I_{pn}K$), нормованої згідно з класом точності давача, розв'язуються система рівнянь (1)–(12), (22), (23):

$$\max \left\{ \left| \frac{f_i}{f_{ip}} \right|, \left| \frac{\delta}{\delta_p} \right| \right\} = 1; \quad (22)$$

$$K_h = \frac{h}{D_{out} - D_{in}}, \quad (23)$$

де f_{ip} , δ_p – нормовані згідно з класом точності струмова й кутова похибки при нормованій кратності K ; K_h – необхідне відношення висоти до ширини осердя.

У системі рівнянь (1)–(12), (22), (23) величини N_p , Z_{sn} , $\cos \varphi_{sn}$, K_n , D_{in} , η , ρ , Δ_s , $A_{s,w}$, K_h і характеристики $f_{ip} = f_{ip}(K)$, $\delta_p = \delta_p(K)$, $\psi = \psi(B)$, $B = B(H) \in$ відомими. Шуканим величинам f_i , δ , H , ψ , l_m , ε , B , A_c , Z_s , $r_{w,s}$, $x_{l,s}$, $\cos \varphi_s$, D_{out} , h та відомим величинам f_{ip} , δ_p , K , які відповідають розв'язку системи рівнянь (1)–(12), (22), (23) при нормованій кратності K , надають індекс j ($j=1, \dots, J$, де J – кількість нормованих кратностей K).

Площа поперечного перерізу осердя приймається рівною $A_c = \max \{A_{c1}, \dots, A_{cj}, \dots, A_{cJ}\}$.

Якщо довжина середньої магнітної лінії осердя l_m (зовнішній діаметр осердя D_{out}) і коефіцієнт потужності кола вторинного струму $\cos \varphi_s \in$ незмінними при розрахунку системи рівнянь (1)–(12), (22), то вона зводиться до

$$\max \left\{ \left| \frac{H \sin(\varphi_s + \psi(B(H)))}{f_{ip} I_{pn} K} \right|, \left| \frac{H \cos(\varphi_s + \psi(B(H)))}{\delta_p I_{pn} K} \right| \right\} = 1; \quad (24)$$

$$I_{pn} K \left[1 - H / (I_{pn} K) \right] \sqrt{[\rho(D_{out} - D_{in} + 2h + 8\Delta_s) N_p K_n / A_{s,w} + Z_{sn} \cos \varphi_{sn}]^2 + [Z_{sn} \sin \varphi_s]^2} = 4,44 B(H) f_0,5 \eta h (D_{out} - D_{in}) N_p K_n^2, \quad (25)$$

де $I_{pn} = N_p I_{pn} / l_m$ – питомий номінальний первинний струм, A^* – виток/м.

У системі рівнянь (24), (25) невідомими є змінні H та h , причому спочатку розв'язується рівняння (24) відносно змінної H , а потім, використовуючи розв'язок рівняння (24), розв'язується рівняння (25) відносно змінної h .

Розв'язок (24) знаходиться наступним чином.

1. Визначається значення допустимої повної похибки:

$$\varepsilon_p = \sqrt{f_{ip}^2 + \delta_p^2}.$$

2. Як перше наближення значення напруженості приймається рівним

$$H = \frac{\varepsilon_p N_p I_{pn} K}{l_m}.$$

3. За характеристикою намагнічування для значень напруженості магнітного поля H знаходяться відповідні значення індукції B . За характеристикою кута втрат для значень індукції B знаходяться відповідні значення кута втрат ψ .

4. Визначаються струмова f_i та кутова δ похибки при отриманих значеннях напруженості магнітного поля H та кута втрат ψ :

$$f_i = \frac{H \sin(\varphi_s + \psi) l_m}{N_p I_{pn} K};$$

$$\delta = \frac{H \cos(\varphi_s + \psi) l_m}{N_p I_{pn} K}.$$

5. Визначається коефіцієнт максимального відхилення фактичних струмової f_i та кутової δ похибок від допустимих струмової f_{ip} та кутової δ_p похибок:

$$K_{max} = \max \left\{ \left| \frac{f_i}{f_{ip}} \right|, \left| \frac{\delta}{\delta_p} \right| \right\}.$$

6. Перевіряється виконання умови

$$0,99 \leq K_{max} \leq 1.$$

Якщо умова виконується, то переходять до пункту 9, в іншому випадку – переходять до п. 7.

7. Уточнюються значення напруженості магнітного поля:

$$H = \frac{H}{K_{max}}.$$

8. Переходять до п. 3.

9. Кінець.

При $\cos \varphi_s = 1$ розв'язком рівняння (25) відносно $h \in$

$$h = \frac{a_h}{\frac{b_h B(H)}{K \left(1 - \frac{H}{I_{pn} K} \right)^{-c_h}}}, \quad (26)$$

де $a_h = \rho(D_{out} - D_{in} + 8\Delta_s) / A_{s,w} + Z_{sn} / (N_p K_n)$;

$b_h = 2,22 f_0,5 \eta (D_{out} - D_{in}) K_n / I_{pn}$; $c_h = 2\rho / A_{s,w}$.

З урахуванням того, що (26) має фізичний зміст, коли знаменник більше нуля, то h тим більше, чим менше

$$\frac{B(H)}{K \left(1 - \frac{H}{I_{pn} K} \right)} = \frac{B}{K(1 - \varepsilon)}.$$

Тому висота осердя, найбільша серед h_j , має таке значення індексу $j=k$, що

$$\frac{B_k}{K_k(1-\varepsilon_k)} = \min \left\{ \frac{B_1}{K_1(1-\varepsilon_1)}, \dots, \frac{B_j}{K_j(1-\varepsilon_j)}, \dots, \frac{B_J}{K_J(1-\varepsilon_J)} \right\}.$$

Найбільшій площі поперечного перерізу серед A_{cj} відповідає висота осердя h_k , рівень індукції B_k при кратності K_k .

Для давача з площею поперечного перерізу осердя $A_c = A_{ck}$ рівень індукції в номінальному режимі роботи B_n можна знайти, розв'язавши систему рівнянь

$$I_{pn} K_k = \frac{4,44 B_k f A_c N_p K_n^2}{(1-\varepsilon_k) Z_s};$$

$$I_{pn} = \frac{4,44 B_n f A_c N_p K_n^2}{(1-H(B_n)/I_{pn}^*) Z_s}.$$

Розв'язати вищенаведену систему рівнянь можна, знайшовши таке B_n , при якому виконується рівність

$$\frac{B_n}{1 - \frac{H(B_n)}{I_{pn}^*}} = \frac{B_k}{K_k(1-\varepsilon_k)}. \quad (27)$$

За (16) K_{FS} є функцією наступних величин: а) індукції B_n та повної похибки ε_n у номінальному режимі роботи, які при наперед визначених значеннях l_m та $\cos\varphi_s$ ($\cos\varphi_s=1$) залежать лише від розв'язку рівнянь (24) й (27), тобто величини I_{pn}^* та характеристик $B=B(H)$, $\psi=\psi(B)$, $f_{ip}=f_{ip}(K)$, $\delta_p=\delta_p(K)$; б) індукції B_{PL} , яка залежать лише від розв'язку рівняння (21), тобто величин I_{pn}^* , B_n , ε_n та характеристики $B=B(H)$. Звідси при наперед визначених значеннях l_m та $\cos\varphi_s$ ($\cos\varphi_s=1$) коефіцієнт безпеки приладів K_{FS} є функцією величин

$$K_{FS} = K_{FS}(I_{pn}^*, K, f_{ip}(K), \delta_p(K), \cos\varphi_s, B(H), \psi(B)). \quad (28)$$

Оскільки рівень індукції B_n залежить лише від розв'язку рівнянь (24) та (27) і є максимальним рівнем, за яким ще забезпечуються вимоги до точності давача, і за (21) B_{PL} є тим менше, чим більше B_n , то, згідно з (16), значення K_{FS} давача з такими B_n та B_{PL} є мінімально можливим, позначатимемо його K_{FSmin} . Звідси, з урахуванням (28), залежність мінімального коефіцієнта безпеки приладів давача K_{FSmin} від питомого номінального первинного струму I_{pn}^* визначена при заданих класі точності, кривих намагнічування й кута втрат магнітного матеріалу осердя та коефіцієнті потужності електричного кола вторинного струму давача, є універсальною для давачів, які проектуються з такими ж переліченими параметрами й характеристиками при наперед визначених l_m та $\cos\varphi_s$. Такі залежності, надані у вигляді кривих, по аналогії з [6] назвемо узагальненими характеристиками.

Алгоритм методики розрахунку K_{FSmin} зображено на рис. 1.

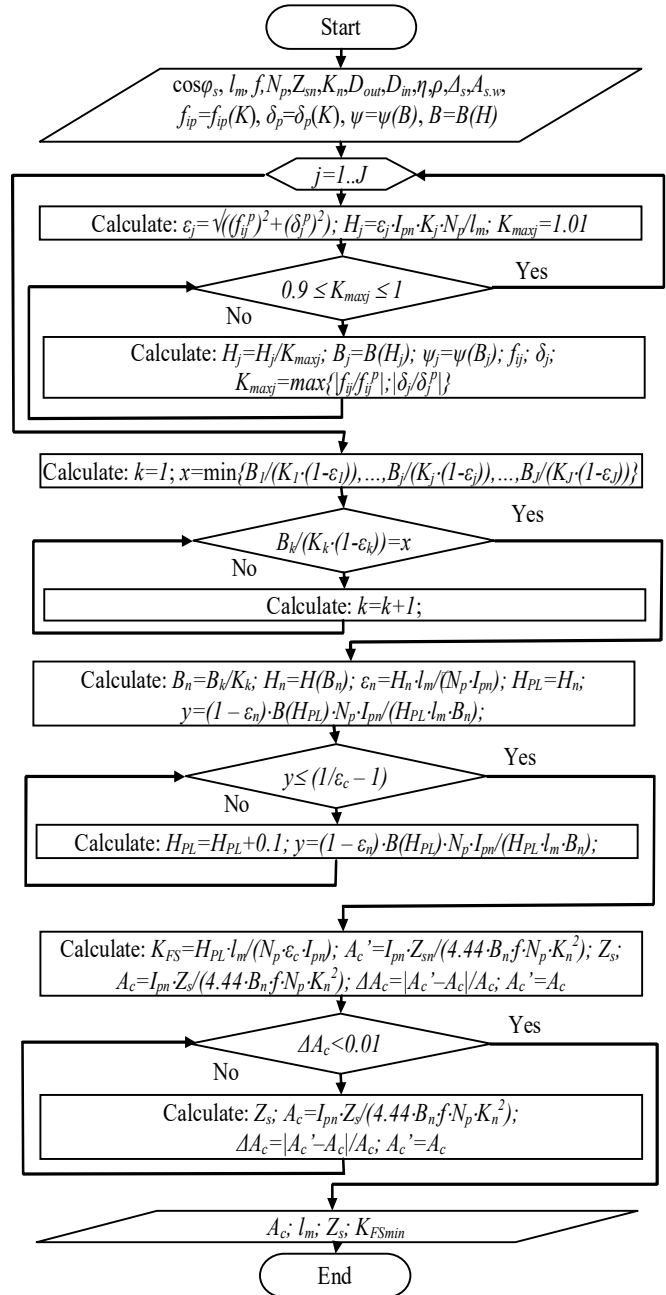


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму методики розрахунку мінімального значення коефіцієнта безпеки (при заданому класі точності давача)

На рис. 2 надано отримані шляхом розрахунку узагальнені характеристики K_{FSmin} для давачів з осердями з магнітних матеріалів [7]–[9], що мають характеристики намагнічування та кута втрат, зображені на рис. 3 [10], різних класів точності й коефіцієнтом потужності кола вторинного струму $\cos\varphi_s=1,0$. Криві, які належать до одного виду матеріалу та класу точності й проходять нижче інших, відповідають матеріалам із більш високою початковою магнітною проникністю. Отримані залежності показують, що

– при заданих питомих номінальних первинних струмах I_{pn}^* найменшими значеннями K_{FSmin} характеризуються осердя з аморфних сплавів, а найви-

щими – осердя з електротехнічних сталей, тобто чим вище початкова магнітна проникність і чим нижчий рівень індукції насичення магнітного матеріалу осердя давача, тим меншими значеннями K_{FSmin} при заданих I_{pn}^* воно характеризується;

– з ростом питомого номінального первинного струму I_{pn}^* мінімальний коефіцієнт безпеки приладів давача K_{FSmin} зменшується, поки не досягає значення 1,2 в.о. (при подальшому рості I_{pn}^* можливе зменшення $K_{FSmin} < 1,2$, але воно не використовується, оскільки при $I_p/I_{pn}^*=1,2$ нормується точність давача згідно з його класом точності);

– при одному й тому ж питомому номінальному первинному струмі I_{pn}^* для давачів із меншим класом точності K_{FSmin} є меншим;

– у нанокристалічних та аморфних сплавів діапазон питомих номінальних первинних струмів, в якому забезпечуються низькі значення коефіцієнта безпеки приладів при високих класах точності давача, суттєво ширший, ніж у електротехнічних сталей.

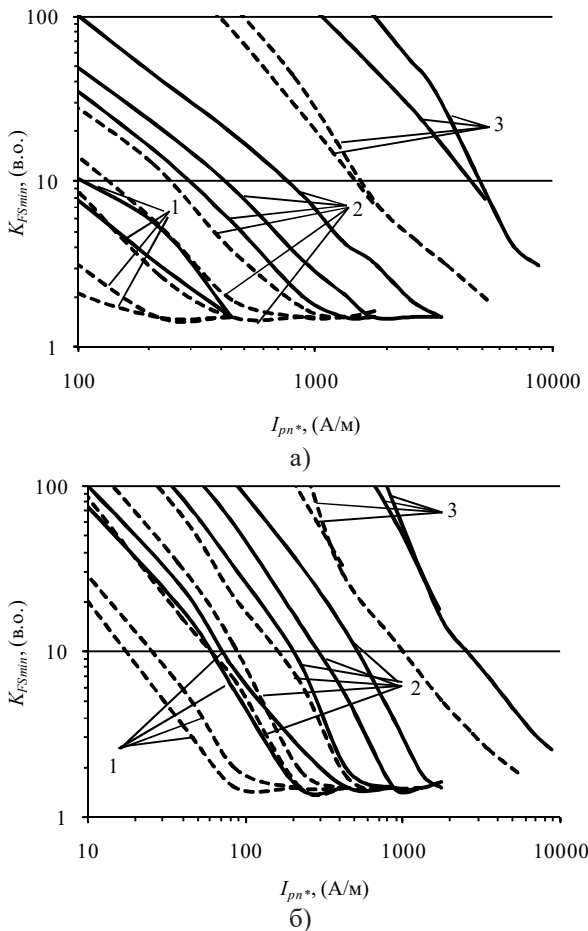


Рисунок 2 – Залежності мінімального коефіцієнта безпеки приладів K_{FSmin} від питомого номінального первинного струму I_{pn}^* для давачів з $\cos\varphi_s=1,0$: а) класи точності 0,2S (—) та 0,5S (- - -); б) класи точності 0,2 (—) та 0,5 (- - -); 1) осердя з аморфного сплаву типу ГМ 501; 2) осердя з нанокристалічного сплаву типу ГМ 414; 3) осердя з електротехнічної сталі марок 3413 та 3408

2. Метод розрахунку електромагнітної системи давача із заданими класом точності й коефіцієнтом безпеки приладів. Якщо фактична площа поперечного перерізу осердя давача $A_c > A_{ck}$, то в номінальному режимі роботи фактичний рівень індукції B_n та повна похибка ε_n є меншими за отримані за (27), тому, згідно з (16), з урахуванням, що за (21) B_{PL} є тим більше, чим менше B_n , коефіцієнт безпеки збільшується. Це дозволяє будувати давач із коефіцієнтом безпеки $K_{FS} > K_{FSmin}$ шляхом вибору площі поперечного перерізу осердя давача, який повинен здійснюватися наступним чином.

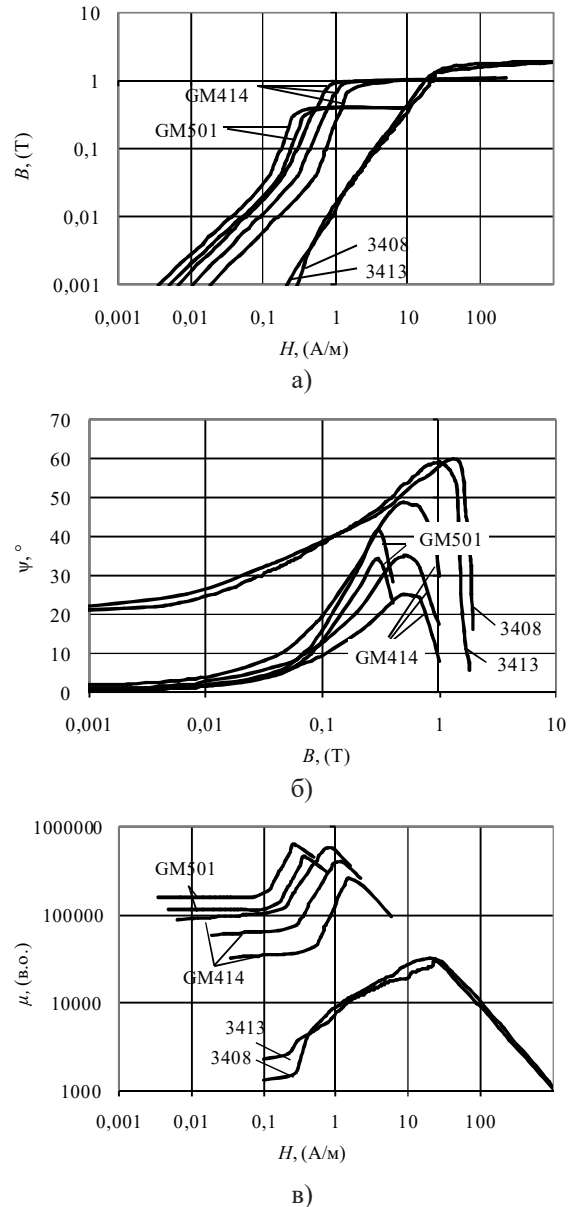


Рисунок 3 – Характеристики намагнічування (а), кута втрат (б) і залежності (в) відносної магнітної проникності μ від напруженості магнітного поля для осердь з аморфного сплаву типу ГМ 501, нанокристалічного сплаву типу ГМ 414 електротехнічної сталі марок 3413 та 3408

1) Визначається магнітний матеріал, у якого при заданих I_{pn}^* , класі точності й $\cos\varphi_s$ значення K_{FSmin} за узагальненими характеристиками (рис. 2) не перевищує необхідного значення K_{FS} .

2) Визначається напруженість H_{PL} та індукція B_{PL} магнітного поля в осерді давача, які відповідають необхідному значенню K_{FS} :

$$H_{PL} = \epsilon_c I_{pn} K_{FS} N_p / l_m ; \quad (29)$$

$$B_{PL} = B(H_{PL}). \quad (30)$$

3) Визначається активна площа поперечного перерізу осердя давача, за якої забезпечується заданий коефіцієнт безпеки приладів K_{FS} :

$$A_{KFS} = (1 - \epsilon_c) I_{PL} Z_s / (4,44 B_{PL} f N_p K_n^2). \quad (31)$$

На першому кроці розрахунку покладається $Z_s = Z_{sn}$.

4) Уточняється значення повного опору кола вторинного струму Z_s . Розрахунок A_{KFS} повторюється для уточненого значення Z_s .

Площа поперечного перерізу осердя за (31) є тим меншою, чим більшим є рівень індукції B_{PL} , що обмежений рівнем індукції насичення. Звідси для забезпечення необхідного коефіцієнта безпеки приладів при заданому класі точності давача доцільним є використання матеріалу з найбільшою індукцією насичення, оскільки при цьому необхідна площа поперечного перерізу осердя є найменшою.

З урахуванням, що ціна у матеріалу з більш низьким класом за магнітною проникністю є меншою, ніж у матеріалу того ж виду, тобто з таким же рівнем індукції насичення, але з більш високим класом за магнітною проникністю, для забезпечення необхідного коефіцієнта безпеки приладів при заданому класі точності давача доцільним є використання матеріалу з найнижчим класом за магнітною проникністю. Тому вибір магнітного матеріалу за характеристиками

$$K_{FSmin} = K_{FSmin}(I_{pn}^*, K_f, \delta_p(K), \cos(\varphi_s), B(H), \psi(B))$$

необхідно здійснювати так, щоб при заданих I_{pn}^* , класі точності та $\cos\varphi_s$ значення K_{FSmin} не перевищувало необхідного значення K_{FS} , а відхилення K_{FSmin} від K_{FS} було мінімальним.

Запропонований у даній роботі метод розрахунку електромагнітної системи давача із заданими класом точності й коефіцієнтом безпеки приладів полягає у використанні узагальнених характеристик мінімального значення коефіцієнта безпеки приладів для вибору виду магнітного матеріалу та його початкової магнітної проникності, які дозволяють отримати давач з оптимальними масогабаритними показниками.

Запропонований у [5] метод розрахунку ТС із заданими класом точності й коефіцієнтом безпеки приладів базується на знаходженні серед магнітних матеріалів, ранжованих за індукцією насичення в напрямку її зменшення та за початковою магнітною проникністю в напрямку її збільшення, такого матеріалу, при використанні якого в осерді площа поперечного перерізу осердя A_{KFS} розрахована, виходячи із забезпечення заданого коефіцієнта безпеки прила-

дів, є не меншою площі поперечного перерізу осердя A_c , розрахованої, виходячи із забезпечення допустимої повної похибки, відповідної класу точності ТС.

При розрахунку A_c за [5], що базується на забезпеченні умови неперевищення повною похибкою ϵ повної похибки ϵ_p , не гарантується забезпечення необхідного класу точності ТС, оскільки не контролюється входження фактичних струмової f_i та кутової δ похибок у допустимі межі $\pm f_{ip}$ та $\pm \delta_p$. Цей недолік виправлено в розробленому й описаному в параграфі 1 способі розрахунку площі поперечного перерізу осердя A_c .

Відмінність між результатами розрахунку площі поперечного перерізу осердя A_c за [5] та описаним у першому параграфі способом може сягати 40 % і залежить від характеристик намагнічування, кута втрат, класу точності й інших параметрів ТС.

Згідно з [5], для розрахунку A_{KFS} приймається, що коефіцієнту безпеки відповідає рівень індукції насичення B_s . Проте значення повної похибки не менше 10 % не обов'язково досягається при рівні індукції насичення B_s , а залежить від магнітних характеристик матеріалу осердя та необхідних параметрів електромагнітної системи ТС.

Результат розрахунку площі поперечного перерізу осердя за описаним у другому параграфі способом є більш точний, ніж за індукцією насичення B_s , як запропоновано в [5], причому відмінність між результатами розрахунку A_{KFS} за порівнюваними способами може сягати 20–40 %.

3. *Експериментальна перевірка.* Для давача з $K_{FS}=5-6$, $\cos\varphi_s=1,0$, класом точності 0,2S, $I_{pn}=1000$ А, $N_p=1$, $l_m=1,139$ м, $K_n=1000$, $Z_{sn}=1$ Ом, $\cos\varphi_s=1$ за характеристиками, наданими на рис 3,а, було встановлено, що оптимальним видом магнітного матеріалу осердя є нанокристалічний сплав. На основі цих даних розраховано параметри осердя та обмоток. Розраховані струмова, кутова й повна похибки давача (табл. 1) для вхідних струмів, регламентованих класом точності 0,2S, знаходяться в межах класу точності.

Таблиця 1 – Метрологічні характеристики давача

I_p/I_{pn} , в.о.	Експеримент			Розрахунок		
	f_{ij} , %	δ_j , мін	ϵ_j , %	f_{ij} , %	δ_j , мін	ϵ_j , %
0,01	0,005	6,9	0,2	-0,022	8,07	0,25
0,05	0,002	6,8	0,2	-0,016	5,34	0,17
0,2	0,01	5,3	0,15	-0,025	4,17	0,13
1,0	-0,036	2,5	0,08	-0,037	1,88	0,07
1,2	-0,035	2,2	0,07	-0,037	1,7	0,07
5,36	-	-	10	-	-	>10

Виготовлено фізичну модель давача. Експериментальні дослідження її метрологічних характеристик (табл. 1) засвідчили відповідність її похибок класу точності 0,2S за номінальним коефіцієнтом безпеки $K_{FS}=5,36$.

ВИСНОВКИ. Одержані залежності мінімального значення коефіцієнта безпеки приладів від питомого номінального первинного струму, визначені для різних характеристик намагнічування й характерис-

тик кута втрат магнітних матеріалів при заданих класі точності та коефіцієнті потужності електричного кола вторинного струму давача, є універсальними й не залежать від інших параметрів давача.

Запропоновано новий метод розрахунку електромагнітної системи давача із заданими класом точності й коефіцієнтом безпеки приладів, в якому вибір виду магнітного матеріалу осердя давача та його початкової магнітної проникності здійснюються на основі одержаних у роботі узагальнених залежностей.

Використання нанокристалічних та аморфних сплавів, завдяки їх високій початковій магнітній проникності й низькому рівню індукції насичення, порівняно з електротехнічними сталями, дозволяє будувати електромагнітні давачі електронного трансформатора струму більш високих класів точності та більш захищених від появи надструмів у їх вторинних колах.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Standard IEC 60044-8: Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers. – Geneva, 2007. – 120 p.
2. Varskyi H., Tankevych S., Hrechko V. Design Features of Electromagnetic Transducer as a Part of Electronic Current Transformer // 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS): Conf. Proc., June 2–6, 2014. – Kyiv, 2014. – PP. 60–62.
3. Гречко В.В., Варський Г.М., Танкевич Є.М. Визначення вимог до метрологічних характеристик електромагнітного давача електронного трансформатора струму // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 39. – С. 121–127.
4. Трансформатори вимірювальні. Част. 1. Трансформатори струму (IEC 60044-1:2003, IDT): ДСТУ–IEC 60044-1:2008. – [Чинний від 2010-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 38 с.
5. Варський Г.М., Танкевич Є.М., Рябчук С.В. Вимірювальний трансформатор струму з заданим мінімальним коефіцієнтом безпеки приладів // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2008. – Вип. 21. – С. 81–85.
6. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
7. Batista T.C., Luciano B.A., F. Raimundo C.S. et al. Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Iss. 615 (1). – PP. S228–S230.
8. Chojnacki J., Liszewski P., Soinski M. et al. Harmonic Distortion of Magnetizing Current in Combined Wound Toroidal Cores // IEEE Transactions On Magnetics. – 2008. – Iss. 44 (11). – PP. 3816–3819.
9. Раскулов Р. Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания // Новости электротехники. – 2005. – Вып. 2 (32). – С. 114–116.
10. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. – 384 с.

METHOD OF CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PART OF MEASURING SENSOR WITH REQUIRED ACCURACY CLASS AND INSTRUMENT SECURITY FACTOR OF ELECTRONIC CURRENT TRANSFORMER

V. Hrechko, H. Varskyi, E. Tankevych

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kiev, 03680, Ukraine. E-mail: varskyi@ied.org.ua

Purpose. To develop method of calculation of electromagnetic part of measuring sensor with required accuracy class and instrument security factor of electronic current transformer (ECT), more accurate and thorough than existing ones. To verify validity of developed method experimentally. **Methodology.** We have formed system of equations and inequalities on the basis of conditions of compliance with requirements for accuracy class of sensor and have worked out technique for solution of such system. We have also developed a procedure of instrument security factor determination which makes it possible to take actual flux density level corresponding to composite error of 10% into consideration. We have established and analysed relationships of instrument security factor on sensor parameters and characteristics which values satisfy solutions of developed set of equations and inequalities. We have correlated the calculated results with the experimental data obtained by means of physical simulation. **Results.** We have established existence of instrument security factor generalized relationships similar for all the sensors with identical set of generalized parameters. This together with account taken of minimality of instrument security factor in electromagnetic system chosen on the basis of conditions of compliance with requirements for accuracy class of sensor enabled us to develop method of calculation of electromagnetic part of sensor with required accuracy class and instrument security factor which is more accurate and thorough than existing ones and allows determination of possibility of implementation of such sensor as well as choosing magnetic characteristics of material by means of which such implementation would be characterized by optimal overall dimensions and cost without preliminary calculations. Validity of developed method is confirmed by agreement of the experimental results with calculated ones. **Originality.** For the first time, we have introduced new method of calculation of electromagnetic part of sensor with required accuracy class and instrument security factor which is based on application of instrument security factor generalized relationships and unlike existing ones is more accurate due to taking into account of conditions of compliance with requirements for accuracy class of sensor and actual flux density level corresponding to composite error of 10% and which requires less expenditures of time and effort

of designer of electromagnetic part of sensor since eliminates necessity of preliminary calculations for choosing magnetic material characteristics. **Practical value.** Implementation of sensor with parameters chosen by means of proposed method allows ensuring of reliability of operation of electronic part of ECT and increasing of technical perfection and quality of ECT on the whole. References 10, tables 1, figures 3.

Key words: current sensor, electronic current transformer, instrument security factor, amorphous and nanocrystalline alloys.

REFERENCES

1. IEC 60044-8, (2002), Instrument transformers. Electronic current transformers.
2. Varskyi, H., Tankevych, S. and Hrechko, V. (2014), "Design Features of Electromagnetic Transducer as a Part of Electronic Current Transformer", *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Conference Proceedings*, Kyiv, June 2–6, 2014, pp. 60–62.
3. Hrechko, V., Varskyi, H. and Tankevych, E. (2008), "Requirements definition of metrological performance of electromagnetic sensor of electronic current transformer", *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, Vol. 39, pp. 121–128. (in Ukrainian)
4. IEC 60044-1, (2003), Instrument Transformers. Current Transformers. (in Ukrainian)
5. Varskyi, H., Tankevych, E. and Ryabchuk, S. (2008), "Current transformer for measurement with predefined minimal instrument security factor", *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, Vol. 21, pp. 81–85. (in Ukrainian)
6. Afanasiew, W.W., Adoniew, N.M., Kibel, W.M. et al. (1989), *Transformatory toka* [Current transformers], Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)
7. Batista, T.C., Luciano, B.A., F. Raimundo, C.S. et al. (2014), "Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, no. 1, pp. S228–S230.
8. Chojnacki, J., Liszewski, P., Soinski, M. et al. (2008), "Harmonic Distortion of Magnetizing Current in Combined Wound Toroidal Cores", *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 44, no. 11, pp. 3816–3819.
9. Raskulov, R. (2005), "Current transformer errors. Fault currents influence", *Novosti elektrotechniki*, Vol. 2, no. 32, pp. 114–116. (in Russian)
10. Starodubtsev, Y.N. and Belozarov, V.J. (1989), *Magnitniye svoystva amorfnyh i nanokristalicheskikh splavov* [Magnetic characteristics of amorphous and nanocrystalline alloys], Ural University Press, Ekaterinburg. (in Russian)

Стаття надійшла 29.04.2016.