

– 2001. – № 10. – С. 168–170. 2. Лозинський А.О. Аналіз стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено / А.О. Лозинський, Л.І. Демків // Донецьк:ІПШ МОН і НАН України «Наука і освіта». – 2008. – Т. 4. – С. 545–549. 3. Лозинський А.О. Дослідження стійкості систем з нестійкою підсистемою (частина 1) / А.О. Лозинський, Демків Л.І. // Електромеханіка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 19–29. 4. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням / Я.Ю. Марущак – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – 207 с. 5. Dombi J. Membership function as an evaluation / J. Dombi // Fuzzy Sets and Systems. – 1990. – Vol. 75. – P. 1–21. 6. Driankov D. Wprowadzenie do sterowania rozmytego / D. Driankov, H.Hellendoorn, M. Reinfrank–Warszawa: «Wydawnictwa Naukowo-Techniczne», 1996. – 320 p. 7. Koprinkova P. Membership function shape and its influence on the dynamical behavior of fuzzy logic controller / P. Koprinkova // Cybernetics and Systems: An International Journal. – 2000. – No. 31. – P. 161–173. 8. Koprinkova P. Membership function shape and its influence on the stability of fuzzy control systems / P. Koprinkova // Cybernetics and Systems: An International Journal. – 2000. – Vol. 31. – P. 353–371. 9. Loetamonphong J. Multi-objective optimization problems with fuzzy relation equation constraints / J. Loetamonphong, S.C. Fang, R.E. Young // Fuzzy Sets and Systems. – 2002. – No. 127.– P. 141–164. 10. Piegat A. Modelowanie i sterowanie rozmyte / A. Piegat–Warszawa: “Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT”, 2003. – 678 p. 11. Zhu Y. A fuzzy optimal control model / Y. Zhu // Journal of Uncertain Systems.–2009. – Vol. 3. No. 4. – P. 270–279.

УДК 621.314.224.8

А.В. Журахівський, Б.М. Кінаш, А.Я. Яцейко, Р.Я. Ференсович
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕСМ

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВТОРИННИХ КІЛ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА ЇХ РОЗКОРОЧЕННЯ

© Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Яцейко А.Я., Ференсович Р.Я., 2012

Розроблено метод обчислення основних показників безпечної роботи трансформаторів струму, який базується на застосуванні теореми повної ймовірності. Метод дозволяє враховувати миттєві значення змінного первинного струму трансформатора струму, а також добові, річні та перспективні графіки діючих значень первинного струму.

Запропонована принципова схема уникнення крахових подій шляхом закорочення вторинної обмотки трансформатора струму в аварійних ситуаціях.

Ключові слова: трансформатор струму, крахова подія, рівень безпечної роботи, ймовірність, захист.

The basic indicators calculation method of current transformers safety operation, based on the consistent application of the full probability theorem was developed. The method allows to take into account the instantaneous values of AC primary current of current transformer, as well as daily, annual and future schedules of existing values of primary current.

The basic scheme for avoiding of crash events through short circuit of current transformer secondary winding in emergency situations was proposed. Byblos 6, fig. 5.

Key words: current transformer, crash event, the level of safety operation, probability, protection.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Трансформатори струму (ТС) високовольтних електроустановок працюють у режимі малого опору навантаження вторинної обмотки, тобто в режимі, близькому до короткого замикання [4]. У разі

порушення цього режиму, яке настає під час погіршення стану контактів, розриву з'єднувальних проводів чи необережного розмикання вторинної обмотки персоналом під час профілактичних перевірок тощо, на виводах вторинної обмотки виникають значні імпульси напруги, амплітуда яких може сягати значень декількох кіловольт. Ці імпульси здатні спричинити смертельне ураження людини або пошкодження чи руйнування самих ТС, приєднаних до вторинних обмоток обладнання та апаратури, тобто крахові події. Такі події у практиці експлуатації ТС, на жаль, відбуваються, тому питання аналізу та подальшого посилення безпеки функціонування вторинних кіл ТС вкрай актуальні.

Разом з тим в літературі, особливо останнім часом, ці питання практично залишаються поза увагою. Це, можливо, пов'язано з тим, що в 70-ті роки минулого століття Б. Стогній, Є. Танкевич, В. Черненко, В. Рогоза, І. Сирота, А. Дроздов, Н.Бачурін та інші проводили широкомасштабні дослідження усталених режимів і перехідних процесів в трансформаторах струму, переважно аналітичними методами, на фізичних моделях, з елементами розрахунків на тодішніх цифрових моделях [1, 3, 6]. З погляду сьогодення вищевказані автори та їх співавтори виконали, без сумніву, титанічну роботу, результатом якої стало можливе впровадження в успішну експлуатацію тодішніх конструкцій трансформаторів струму, які здебільшого експлуатуються і дотепер (див. наприклад, [1, 6]).

Тим не менше, майже поза увагою залишилась така проблема, як дослідження та аналіз режимів роботи трансформаторів струму після розкорочення (розриву) їх вторинних обмоток. Лише в [1, 3] аналізуються такі режими (розкорочення вторинних обмоток ТС), а в [1] пропонується схема захисту ТС від перенапруг, що виникають після розкорочення його вторинного кола. Схема захисту базується на електромеханічному балансному реле з застосуванням спеціального захисного витка, намотаного на осердя трансформатора струму. Однак в [1] не наводяться конкретні параметри такого реле, як і немає інформації про використання подібних реле захисту в експлуатації.

Задача досліджень

Метою роботи є аналіз режимів роботи трансформаторів струму за раптового (непередбачуваного) розмикання їх вторинної обмотки та опрацювання заходів з мінімізації можливих небезпечних наслідків подібних аварійних ситуацій.

Виклад основного матеріалу

Рівень безпечної роботи вторинних кіл та й самих ТС доцільно та зручно оцінювати частотою виникання крахової події $\omega_{к.п.}$, тобто частотою виникання на виводах вторинної обмотки високовольтних імпульсів напруги з амплітудою, значення яких достатнє для смертельного ураження людини чи пошкодження приєднаної до ТС апаратури, зокрема і самого трансформатора струму (залежно від мети дослідження). Згідно з [4], напруга на його вторинній обмотці не повинна перевищувати 1кВ (величина випробувальної напруги вторинних кіл в умовах експлуатації). Частоту $\omega_{к.п.}$ вважатимемо основним показником безпечної роботи ТС і визначатимемо за формулою

$$\omega_{к.п.} = p_{к.п.} \cdot \omega_{п.р.}, \quad (1)$$

де $p_{к.п.}$ – імовірність виникання крахової події під час одного порушення нормального режиму ТС, пов'язаного з розмиканням вторинної обмотки, тобто ймовірність виникання пошкоджувального імпульсу напруги; $\omega_{п.р.}$ – частота порушень режиму, тобто кількість розмикань вторинної обмотки, рік⁻¹.

Частоту $\omega_{п.р.}$ визначають за статистичними даними чи експертним шляхом, якщо статистичні дані для цього типу ТС відсутні. Ймовірність $p_{к.п.}$ можна розрахувати за допомогою викладеного в цій роботі методу. Наявність основного показника дає змогу визначити інші показники безпеки: інтенсивність виникання крахової події $\lambda_{к.п.}$, середню тривалість безкрахової (безпечної) роботи $T_{к.п.}$ тощо.

$$\lambda_{к.п.} = \omega_{к.п.}, \text{ рік}^{-1}; T_{к.п.} = 1/\omega_{к.п.}, \text{ років}. \quad (2)$$

Дослідження шляхом математичного моделювання перехідних процесів, які виникають під час розмикання вторинних обмоток ТС, дозволили виявити характер зміни вторинної напруги. На

рис. 1 зображена одна з можливих реалізацій випадкової функції напруги $u_2(t)$ на виводах вторинної обмотки після її розмикання. У початковий момент часу спостерігається різке підвищення напруги, тобто виникання імпульсу $u_{\text{імп}}(t)$, який пізніше переходить в періодичну усталену несинусоїдну напругу $u_{\text{уст}}(t)$.

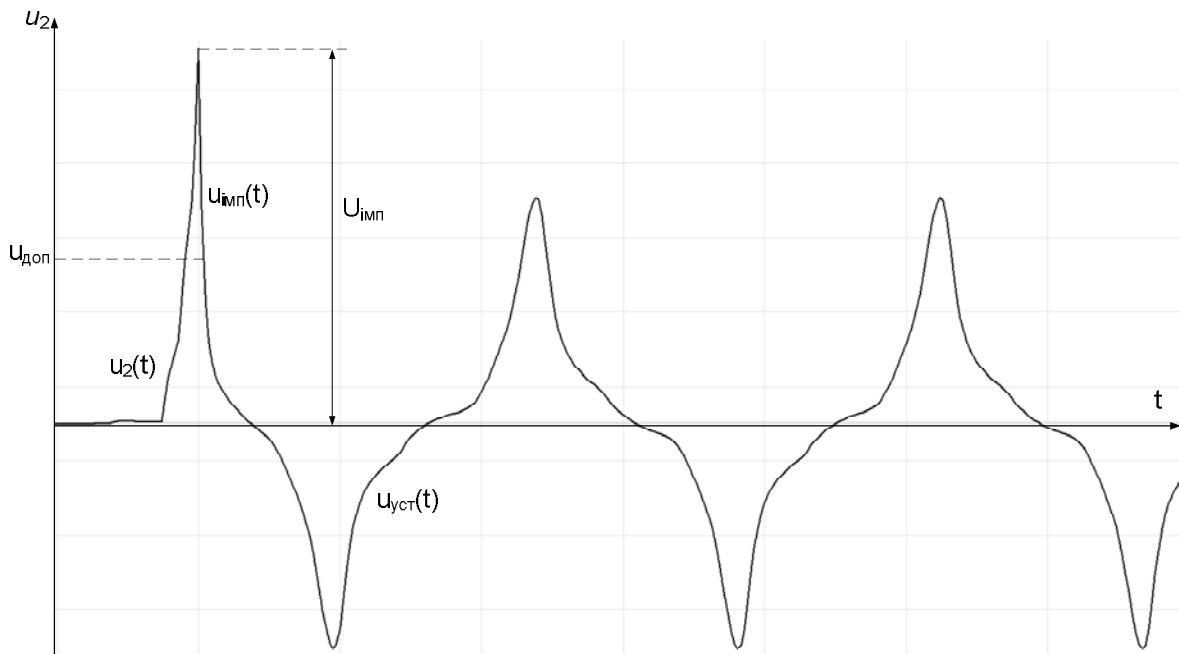


Рис. 1. Осцилограма напруги $u_2(t)$ на виводах вторинної обмотки ТС після її розмикання

Небезпеку для приєднаної до вторинної обмотки ТС апаратури та обслуговуючого персоналу становить такий імпульс напруги $u_2(t)$, амплітуда $u_{\text{імп}}$ якого перевищує допустиме для апаратури чи для людини значення $u_{\text{доп}}$, бо тоді настає пробиття ізоляції апаратури (деколи її руйнування) чи смертельне ураження людини (крахова подія). Значення $u_{\text{доп}}$ визначається для апаратури електричною міцністю ізоляції, а для людини – опором її тіла чи електричною міцністю захисних засобів.

Наведений нижче алгоритм обчислення ймовірності $P_{\text{к.п}}$ передбачає багаторазовий розрахунок амплітуди імпульсу $u_{\text{імп}}$ для різних миттєвих значень первинного синусоїдного струму $i_1(t)$ ТС. Такі обчислення можна виконувати за розрахунковою схемою, зображеною на рис. 2.

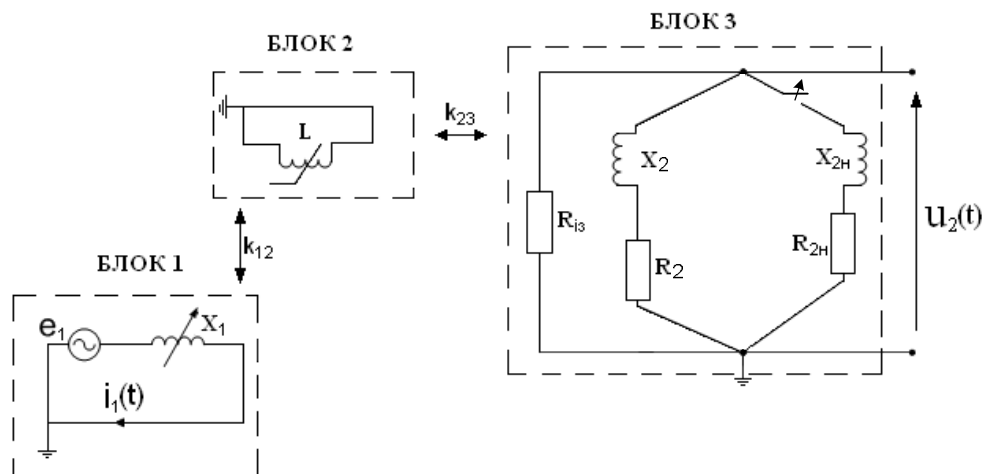


Рис. 2. Розрахункова схема ТС

Схема містить три розрахункові блоки. Блок 1 призначений для відтворення первинного синусоїдного струму $i_1(t)$ заданої амплітуди. Значення амплітуди задається зміною опору X_1 . Блок 2 за допомогою нелінійної індуктивності L еквівалентує магнітопровід ТС. Блок 3 враховує параметри віток заступної схеми ТС. На його вторинних виводах наводиться напруга $u_2(t)$ та фіксується амплітуда імпульсу $u_{i\text{тп}}$. Розмикання вторинної обмотки здійснюється розмиканням вітки навантаження $X_{2н}, R_{2н}$. У блоці 3 позначено: R_{i3} – опір ізоляції ТС відносно землі; R_2, X_2 – параметри вторинної обмотки ТС. Зв'язок між першим та другим блоками задано коефіцієнтом k_{12} , який дорівнює коефіцієнтові трансформації досліджуваного трансформатора. Зв'язок між другим та третім блоками задано коефіцієнтом k_{23} , який дорівнює одиниці.

Амплітуда імпульсу $u_{i\text{тп}}$ залежить від миттєвого значення первинного струму в момент розмикання вторинної обмотки. Зі збільшенням цього струму амплітуда імпульсу зростає. Врахувати цю залежність необхідно на великому інтервалі часу, оскільки розмикання вторинної обмотки може настати в будь-який момент багаторічного функціонування ТС.

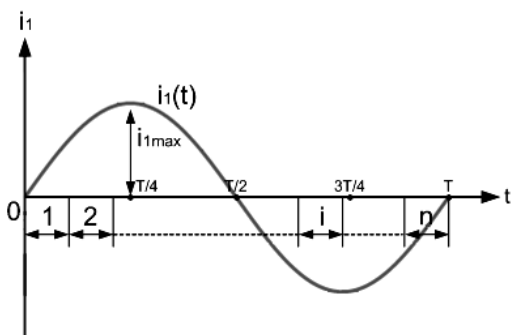


Рис. 3. Осцилограма первинного синусоїдного струму ТС

Така обставина змушує під час розрахунків імовірності $P_{к.п.}$ враховувати момент розмикання обмотки в діапазоні часу тривання синусоїди первинного змінного струму заданої амплітуди (рис. 3), а також зміну первинного струму згідно з добовим (рис. 4, а) та річним (рис. 4, б) графіками. Щоб надалі чітко розрізняти ці три розрахункові випадки, будемо в формулах та в тексті користуватися для позначення врахованих величин такими індексами: 1, і, n – для синусоїди первинного змінного струму заданої амплітуди; 2, j, m – для добового графіка первинного струму; 3, s, r – для річного графіка первинного струму.

Стосовно першого випадку, тобто синусоїдного струму заданої амплітуди відзначимо такі результати досліджень. Якщо розмикання обмотки настає в момент часу $t=0$ (рис. 3), тобто коли миттєве значення первинного струму $i_1(t)$ дорівнює нулю, то імпульс відсутній, а існує лише періодична усталена несинусоїдна напруга $u_{y\text{ст}}(t)$. Якщо розмикання настає в момент $t=T/4$ або $3/4T$, то амплітуда імпульсу напруги максимальна. Для проміжних значень часу $0 < t < T/4$ та $T/2 < t < 3/4T$ амплітуда імпульсу напруги зростатиме зі збільшенням миттєвого значення струму.

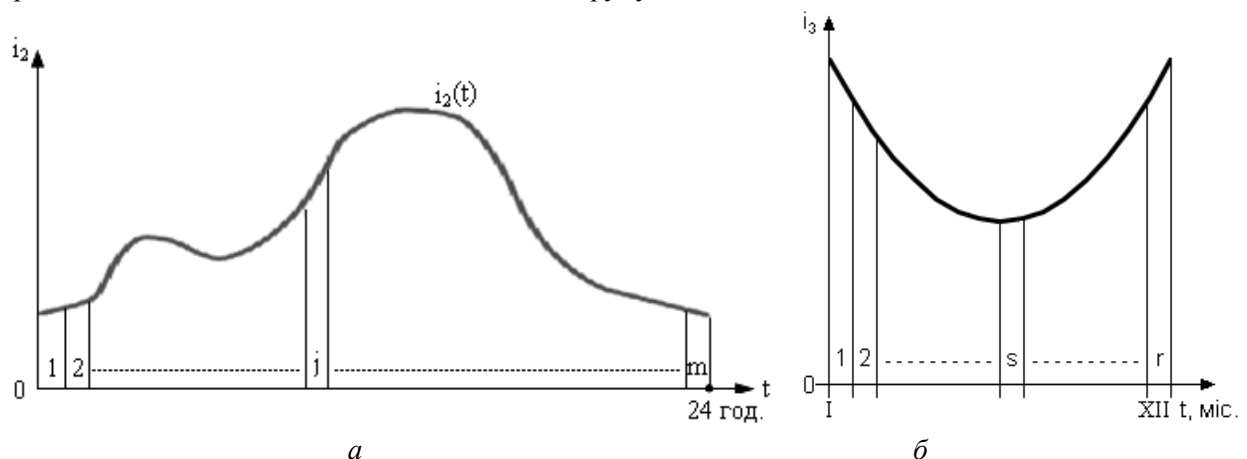


Рис. 4. Графіки навантажень: а – добовий; б – річний

Різні значення амплітуд імпульсу напруги зумовлюють той факт, що в частині випадків вони не досягнуть допустимого значення $u_{доп}$, а в іншій частині випадків – перевищать його,

спричинивши крахову подію. Якщо період синусоїди (рис. 3) розділити на n проміжків, то ймовірність $P_{1 \text{ к.п.}}$ крахової події в разі одного розмикання вторинної обмотки можна обчислити за формулою повної ймовірності [2]

$$P_{1 \text{ к.п.}} = P(A_1) = \sum_{i=1}^n P(H_{1i}) \cdot P(A_1/H_{1i}), \quad (3)$$

де $P(A_1)$ – ймовірність складної події A_1 , тобто ймовірність крахової події незалежно від того, на якому проміжку часу настане розмикання обмотки; $P(H_{1i})$ – ймовірність потрапляння моменту розмикання обмотки в i -й проміжок часу; $P(A_1/H_{1i})$ – ймовірність крахової події в разі потрапляння моменту розмикання обмотки в i -й проміжок.

Ймовірність потрапляння моменту розмикання вторинної обмотки в i -й проміжок шириною Δt_i дорівнює $\Delta t_i/T$, а в разі поділу тривалості періоду на проміжки однакової ширини ця ймовірність дорівнює $1/n$. Отже, отримуємо

$$P(H_{1i}) = \frac{\Delta t_i}{T} \vee \frac{1}{n} \quad (4)$$

Ймовірність $P(A_1/H_{1i})$ має два значення: нуль, коли амплітуда імпульсу в i -му проміжку $u_{\text{імп}i}$ менша від $u_{\text{доп}}$; одиниця, коли $u_{\text{імп}i}$ більша від $u_{\text{доп}}$. Значення 0 або 1 ймовірності $P(A_1/H_{1i})$ розраховується на кожному з n -проміжків, а далі підсумовуванням добутків $P(H_{1i}) \cdot P(A_1/H_{1i})$ згідно з формулою (3) обчислюється значення шуканої ймовірності $P_{1 \text{ к.п.}}$. Для поточних значень миттєвого струму $i_1(t_i)$ амплітуда імпульсу напруги $u_{\text{імп}i}$ розраховується за створеною для цього комп'ютерною програмою на кожному кроці обчислень або визначається заздалегідь за розрахованою залежністю $u_{\text{імп}} = f(i_1(t))$. Базою для вказаних обчислень слугує розрахункова схема ТС, зображена на рис. 2.

Розраховане за формулою (3) значення ймовірності $P_{1 \text{ к.п.}}$ справедливе для незмінного за амплітудою первинного синусоїдного струму і використовується як проміжна розрахункова величина для обчислення показника безпеки $P_{\text{к.п.}}$, який повинен враховувати усі можливі зміни первинного струму ТС протягом доби, року, декількох років, оскільки термін роботи ТС вимірюється роками чи навіть десятиліттями, а розмикання вторинної обмотки можуть наставати в будь-які моменти функціонування ТС.

У диспетчерських службах електроенергетичних підприємств фіксують щогодинне значення струму приєднань, на яких встановлені ТС. Це дозволяє будувати добові графіки первинного струму ТС для будь-яких днів року. На рис. 4а зображено добовий графік діючого значення первинного струму ТС $i_2(t)$ для одного з днів року.

Розділимо 24 години на m різних чи однакових за тривалістю проміжків так, щоб струм у межах кожного j -го проміжку був приблизно однаковим. За цієї умови для кожного j -го проміжку можна розрахувати за формулою (3) значення $P_{1 \text{ к.п.}j}$, тобто значення ймовірності крахової події в разі потрапляння моменту розмикання обмотки в j -й проміжок часу доби. Для обчислення значення ймовірності $P_{2 \text{ к.п.}}$, тобто ймовірності крахової події, коли розмикання обмотки настає в будь-який момент доби, можна також використати формулу повної ймовірності, записану у вигляді

$$P_{2 \text{ к.п.}} = P(A_2) = \sum_{j=1}^m P(H_{2j}) \cdot P(A_2/H_{2j}), \quad (5)$$

де j – поточний номер проміжку добового графіка; $P(H_{2j})$ – ймовірність потрапляння моменту розмикання обмотки в j -й проміжок; $P(A_2/H_{2j})$ – ймовірність крахової події під час розмикання обмотки в разі потрапляння моменту розмикання в j -й проміжок доби.

Складові формули (5) розраховуються за такими виразами:

$$p(H_{2j}) = \frac{\Delta E_j}{24} \cdot \frac{1}{m}; \quad p(A_2/H_{2j}) = p_{2\text{к.п.}j}. \quad (6)$$

Розрахункова величина $p_{2\text{к.п.}}$ ще не є показником безпечної роботи ТС, оскільки добові графіки первинного струму протягом року різні і мають різні значення $p_{2\text{к.п.}}$. Необхідно усереднити ці значення та врахувати річний графік первинного струму. Для цього такий графік розбивають на r проміжків і розраховують імовірність $p_{3\text{к.п.}}$ крахової події в разі розмикання обмотки в будь-який момент року за формулами

$$p_{3\text{к.п.}} = p(A_3) = \sum_{s=1}^r p(H_{3s}) \cdot p(A_3/H_{3s}); \quad (7)$$

$$p(H_{3s}) = \frac{\Delta t_s}{8760} \cdot \frac{1}{r}; \quad p(A_3/H_{3s}) = p_{3\text{к.п.}s}, \quad (8)$$

де s – поточний номер проміжку річного графіка струму; 8760 – тривалість року в годинах.

Під час розрахунків за формулами (7), (8) для кожного s -го проміжку потрібно мати свій добовий графік струму.

Якщо в перспективі протягом декількох років первинний струм ТС змінюється мало, то для кожного року незмінним залишається значення $p_{3\text{к.п.}}$, що дозволяє вважати його показником безпечної роботи ТС, тобто

$$p_{\text{к.п.}} = p_{3\text{к.п.}} \quad (9)$$

Якщо ж зміна первинного струму ТС у перспективі експлуатації істотна, то для визначення значення показника безпеки $p_{\text{к.п.}}$ необхідно додатково виконати ще один цикл обчислень аналогічним до наведених випадків способом.

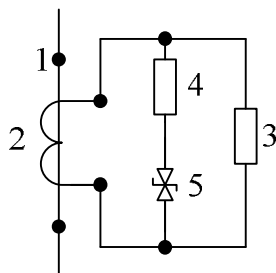


Рис. 5. Принципова схема захисту ТС

Одним з можливих способів захисту трансформатора струму є принципова схема, запропонована в [5] (рис. 5).

Суть її роботи така. Безпосередньо до виводів вторинної обмотки 2 ТС під'єднується стабілітрон 5, який за нормальних умов не пропускає струму і не впливає на роботу навантаження 3 вторинної обмотки. Послідовно до стабілітрона вмикається обмежувальний опір 4. Первинна обмотка ТС на рис. 5 позначена 1. В разі обриву навантаження (розкорочення вторинної обмотки) та появи небезпечної перенапруги на її виводах, стабілітрон відкривається та не допускає підвищення напруги на виводах понад допустиму величину (як правило, ≤ 1 кВ). Цим самим не допускається пробій ізоляції самого

ТС, вторинних кіл, що живлять релейний захист, кола обліку та сигналізації тощо. До певної міри менша небезпека загрожуватиме й обслуговуючому персоналу.

Дослідження різних типів трансформаторів струму під час розмикання вторинних обмоток за наявності первинних струмів різної величини показують, що конкретна реалізація принципової схеми рис. 5 буде дещо різною і потребує глибших досліджень, що й буде здійснено надалі.

Це пов'язано з тим, що далеко не у всіх трансформаторах струму виникають небезпечні перенапруги після розкорочення (обриву) вторинних кіл. Тому вважаємо, що першочерговими завданнями сьогодні є: виявлення тих типів трансформаторів струму, які можуть бути аварійно небезпечними, оцінка можливих режимів їх роботи та величин максимальних перенапруг, а також особливо важливим завданням є розробка ефективного пристрою захисту.

Висновки

1. Запропонований метод обчислення показників безпечної роботи трансформаторів струму є простим, прозорим, зручним для програмування та забезпечує необхідну точність аналізу в разі

наявності надійної вхідної інформації стосовно графіків первинного струму, величин допустимих рівнів напруг і статистики розмикань вторинних обмоток ТС.

2. Запропонована принципова схема обмеження перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму, конкретна реалізація якої потребує додаткових досліджень, аналізу та конкретних практичних пропозицій щодо її виготовлення.

1. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока: расчеты и конструкции. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 376 с. 2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1972. – 368 с. 3. Кошмидер А. Перенапряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока при насыщении сердечника // Электромеханика. – 1972. – № 5. – С. 503–506. 4. Нормативний документ. СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301:2004. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в системах релейного захисту. Інструкція. – К., 2005. – 71 с. 5. Патент на корисну модель № 49392. Спосіб захисту трансформатора струму від перенапруг / А.В. Журахівський, А.Я. Яцейко, М.М. Смігуровська, В.Я. Вінтонюк. – Опубл. 26.04.2010 р. Бюл. № 8. – 4 с. 6. Стогний Б.С. Анализ и расчет переходных режимов работы трансформаторов тока. – К.: Наук. думка, 1972.

УДК 612.335.43 – 501.72

Л. Карплюк, Б. Панченко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНОКЕРОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ТЯГОВИХ МЕХАНІЗМІВ

© Карплюк Л., Панченко Б., 2012

Проаналізовано побудову електромеханічної системи тягового електропривода. Наведено результати дослідження. Результати можуть бути використані під час розроблення тягових електроприводів.

Ключові слова: *тяговий електропривід, система керування, паралельне ввімкнення регуляторів.*

The control system of drive electric trains has been analysed. The conclusions have been drawn from the results of the research. The result may be used during the designing electric drives.

Key word: *train electric drive, control system, parallel connect of regulator.*

Постановка задачі

Сучасні засоби електротранспорту отримують живлення від контактної електричної мережі постійного струму. Електричну енергію можна подавати ззовні або від внутрішнього джерела енергії – акумуляторних батарей, автономної енергетичної установки з первинним дизельним або газотурбінним двигуном та генератором електричної енергії.

Основними вимогами до системи електропривода є забезпечення регулювання оператором та стабілізацію системою керування рівня споживання потужності електроприводом в усталених режимах та регулювання моментів тягових двигунів у динамічних режимах, стабілізація швидкості руху в маневрових режимах. При цьому величина цих параметрів не повинна перевищувати допустимих для електричного та механічного обладнання максимальних значень.