

## КОМУТАЦІЙНІ ПЕРЕНАПРУГИ У ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРУГИ

Ю.І.Тугай<sup>1</sup>, докт.техн.наук, О.І.Ганус<sup>2</sup>, канд.техн.наук, К.О.Старков<sup>2</sup>, канд.техн.наук<sup>1</sup> - Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 06380, Україна,

e-mail: tugay@ied.org.ua

<sup>2</sup> - АК «Харківобленерго»,  
вул. Плеханівська, 149, Харків, 61037, Україна,

e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

Вимірювальні трансформатори є джерелом необхідної інформації для систем керування режимами розподільних електричних мереж. Тому забезпечення надійного їхнього функціонування – актуальна теоретична та практична задача. Метою даного дослідження є розробка нелінійної динамічної математичної моделі для оцінювання можливості появи небезпечних для обмоток значень комутаційних перенапруг. Виконано аналіз рівнянь, які описують електромагнітні перехідні процеси у схемі заміщення трансформатора напруги. Реалізація запропонованої моделі дасть можливість передбачати появу перенапруг і обирати заходи по їхньому запобіганню. Бібл. 5, рис. 1.

**Ключові слова:** розподільна електромережа, трансформатор напруги, перенапруги.

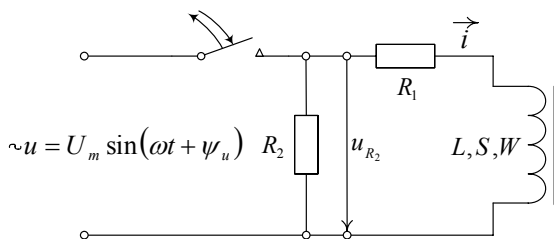
Постійно зростаючі вимоги до надійності та якості електропостачання спричинили виникнення нової концепції розвитку розподільних електричних мереж, яка отримала назву Smart Grid. Ця концепція направлена на автоматизацію керування роботою електричних мереж у реальному часі. Для забезпечення ефективності системи Smart Grid засоби її керування повинні оперативно здійснювати обробку великих об'ємів інформації про поточні параметри режимів, яку забезпечують вимірювальні трансформатори. Але доводиться констатувати, що на практиці значною проблемою все ще залишається підвищена пошкоджуваність трансформаторів напруги (ТН) розподільних електричних мереж, незважаючи на дотримання всіх вимог та рекомендацій від виробників щодо забезпечення їхньої надійності [4]. Загальноприйнятою є точка зору, що причиною такого стану речей є квазістаціонарні ферорезонансні процеси. Запропоновано та реалізовано на практиці різні засоби запобігання цим процесам [3, 5, 6]. Але, незважаючи на те, що завдяки вжитим заходам у діючих електричних мережах спостерігається певне покращення ситуації, проблема забезпечення надійної роботи ТН у цілому залишається нерозв'язаною. У той же час проведений аналіз ушкоджень обмоток ТН показав, що причиною виходу їх з ладу, поряд зі квазістаціонарними ферорезонансними перенапругами, є й перенапруги, спричинені перехідними процесами під час виконання робочих та аварійних комутацій.

Слід відзначити, що процеси в електричних колах за наявності котушки з феромагнітним осердям характеризуються складною динамікою через цей нелінійний елемент. Для таких процесів характерними є висока чутливість по відношенню як до початкових умов, так і до факторів впливу. Мета статті полягає у розробці нелінійної динамічної математичної моделі для аналізу перехідних процесів в електромагнітних ТН і оцінювання кратності перенапруг при виконанні комутацій у розподільних електричних мережах.

Елементи схеми заміщення ТН [2] характеризуються наступними параметрами:  $R_1$  – активний опір первинної обмотки;  $R_2$  – еквівалентний активний опір навантаження;  $L$  – нелінійна індуктивність первинної обмотки;  $S$  – поперечний переріз магнітопроводу;  $W$  – кількість витків первинної обмотки;  $l$  – довжина середньої лінії магнітопроводу. В первинній обмотці ТН протікає струм  $i$ , а на навантаженні  $R_2$  напруга  $u_{R_2}$ .

З достатньо високою точністю характеристика намагнічування ТН може бути апроксимована гіперболічним синусом [1]

$$H = \alpha sh \beta B_d, \quad (1)$$



де  $H$  – миттєве значення напруженості;  $B_d$  – значення дійсної індукції магнітного поля в магнітопроводі;  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти апроксимації.

При відключенні нелінійної індуктивності електромагнітного ТН від джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_U)$  виникають перенапруги. Режим у колі характеризується диференціальним рівнянням загального вигляду

$$\frac{dy}{dt} + c(y^2 - 1) = by \sin(\omega t + \psi_U). \quad (2)$$

З урахуванням (1) рівняння (2) може бути записане в асимптотичному вигляді ( $y=e^b$ )

$$\frac{db}{dt} + cshB = b \sin(\omega t + \psi_U), \quad (3)$$

де  $b = \frac{U_m \beta}{SW}$ ,  $c = \frac{R_1 \alpha l \beta}{SW_2}$ ,  $B = \beta B_{дл}$ .

Відомо, що у колах зі сталлю при синусоїдальній напрузі джерела індукція магнітного поля в магнітопроводі наближена до вигляду гармонійної функції (на відміну від струму в обмотці), і тому припустимо гармоніками вищих порядків знехтувати. Тоді розв'язок рівняння (3) для усталеного режиму може бути знайдено у вигляді першої гармоніки індукції магнітного поля в осерді

$$B = B_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4)$$

де  $B_m = B_{мд} \beta$ ;  $B_{мд}$  – амплітудне значення дійсної індукції магнітного поля в магнітопроводі.

З урахуванням (1) миттєве значення струму кола в усталеному режимі обчислюється

$$i(t) = \frac{\alpha L}{W} sh[B_m \sin(\omega t + \psi)]. \quad (5)$$

Нехай у момент відключення  $t_0$  індукція магнітного поля в осерді дорівнює  $B(t_0) = B_m \sin(\omega t_0 + \psi)$ , тоді напруга на навантаженні буде визначатися рівнянням

$$u_{R2}(t) = \frac{2\alpha L}{W} R_2 \frac{(y_0 + 1)(y_0 - 1)e^{2ct}}{[(y_0 + 1)^2 e^{4ct} - (y_0 - 1)^2]}, \quad (6)$$

де  $y_0 = \exp[B_m \sin(\omega t_0 + \psi)]$ . Згідно з (6) у момент відключення напруга на опорі  $R_2$  дорівнюватиме

$$u_{R2}(t_0) = \frac{\alpha L R_2}{W} sh[B_m \sin(\omega t_0 + \psi)]. \quad (7)$$

Максимальний рівень напруги на навантаженні буде, якщо відключення ТН від джерела синусоїдальної напруги сталося у момент часу, відповідний  $\omega t_0 + \psi = \pi/2$ . При цьому напруга сягає значення

$$U_{R2\max} = \pm R_2 \frac{\alpha L}{W} sh 2B_m. \quad (8)$$

Аналіз виразів (7) та (8) дозволяє зробити висновок, що найбільш важким для обмоток ТН з точки зору кратностей перенапруг є режим, коли його підключення до електричної мережі відбувається у момент компенсації перехідною складовою індукції максимального значення усталеного режиму. При відключенні ТН максимальні кратності перенапруг будуть при виконанні комутації через півперіоду після включення. Індукція магнітного поля в магнітопроводі при цьому може досягти подвоєного значення. З цієї причини використання короткочасного шунтування навантаження ТН (як заходу зниження кратності перенапруг) найбільш ефективно у тих випадках, коли відключення ТН відбувається в моменти часу, при яких попередній перехідний процес (наприклад, внаслідок включення ТН) ще повною мірою не завершений і мають місце ненульові початкові умови.

Використання розробленої нелінійної динамічної математичної моделі для аналізу перехідних процесів в електромагнітних ТН на практиці дозволить передбачити появу небезпечних перенапруг під час виконання комутацій, а також обрати заходи щодо їхнього попередження. Зокрема це стосується програмного виконання комутацій елегазовими вимикачами з використанням резистора, що шунтує вторинну обмотку ТН.

1. Бессонов Л.А. Переходные процессы в нелинейных электрических цепях со сталью. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – 163 с.

2. Ганус О.І., Старков К.О. Дослідження моделі нелінійної індуктивності трансформатора напруги як чинника, що впливає на виникнення ферорезонансних процесів // Вісник ХНТУСГ "Технічні науки". – 2014. – Вип. 153. – С. 11–14.

3. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Захист електричних мереж 6–35 кВ від ферорезонансних процесів // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 70–76.

4. Назаров В.В. О трансформаторах напряжения и устройствах контроля изоляции в сетях 6–35 кВ // Энергетика та електрифікація. – 2000. – № 4. – С. 27–29.

5. Ferraci P. Ferroresonance // Group Schneider. – 1998. – No 190. – 28 p.
6. Tugai Yu., Tugai I. A combined method for study of ferroresonance processes in voltage transformer. – 2014 IEEE Int.Conf.on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS – 2014): Proc. of the Int. Conf. – Pp. 71–73.

УДК 621.316.06

## КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю.И.Тугай<sup>1</sup>, докт.техн.наук, О.И.Ганус<sup>2</sup>, канд.техн.наук, К.А.Старков<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> - Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 06380, Украина,

e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

<sup>2</sup> - АК «Харьковоблэнерго»,

ул. Плехановская, 149, Харьков, 61037, Украина,

e-mail: [ptu1@obl.kh.energy.gov.ua](mailto:ptu1@obl.kh.energy.gov.ua)

*Измерительные трансформаторы являются источником необходимой информации для систем управления режимами распределительных электрических сетей, в том числе современных Smart Grid. Поэтому обеспечение надежного функционирования этого источника является актуальной теоретической и практической задачей. Целью данного исследования является разработка нелинейной динамической математической модели для анализа переходных процессов в электромагнитных трансформаторах напряжения и оценки возможности появления опасных для обмоток трансформаторов значений коммутационных перенапряжений. Выполнен анализ уравнений, описывающих электромагнитные переходные процессы в схеме замещения трансформатора напряжения. Реализация полученной модели даст возможность предсказать появление перенапряжений и выбрать мероприятия по их предотвращению. Библи. 6, рис. 1.*

**Ключевые слова:** распределительная электросеть, трансформатор напряжения, перенапряжения.

## THE SWITCHING IN VOLTAGE TRANSFORMER

Yu.I.Tugay<sup>1</sup>, O.I.Ganus<sup>2</sup>, K.O.Starkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 06380, Ukraine,

e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

<sup>2</sup> - JSC "Kharkivoblenerho", str. Plekhanov, 149, Kharkiv, 61037, Ukraine.

e-mail: [ptu1@obl.kh.energy.gov.ua](mailto:ptu1@obl.kh.energy.gov.ua)

*Instrument transformers are sources of information required for mode control systems, power distribution networks, including advanced Smart Grid. Therefore, to ensure reliable operation of this source is relevant theoretical and practical task. The aim of this study is to develop a mathematical model of nonlinear dynamic analysis of electromagnetic transients in transformers and voltage rating switching surges in the distribution networks. It differs from previous studies in which the cause of failure of the voltage transformer ferroresonance considered quasi-stationary processes. The analyses of the equations are describing the electromagnetic transients in voltage transformer equivalent circuit. Using the resulting model makes it possible to anticipate the occurrence of surge and choose the measures their prevention. References 6, figure 1.*

**Keywords:** distribution network, voltage transformer, overvoltage.

1. Bessonov L.A. Transients in nonlinear electrical circuits with steel. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1951. – 163 p. (Rus)
2. Hanus A.I., Starkov K.A. The mathematical model of the nonlinear inductance of the transformer voltage as a factor influencing the occurrence of ferroresonance processes // Visnyk KhNTUSH "Tekhnichni nauky". – 2014. – Vol. 153. – Pp. 11–14. (Ukr)
3. Zhurakhivskiy A.V., Kems Yu.A., Yatseiko A.Ya., Masliak R.Ya. Protection of electrical networks 6-35 kV from ferroresonance processes // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 5. – Pp. 70–76. (Ukr)
4. Nazarov V.V. About voltage transformers and insulation monitoring devices in networks of 6-35 kV // Enerhetyka i Elektryfikatsiia. – 2000. – No 4. – Pp. 27–29. (Rus)
5. Ferraci P. Ferroresonance // Group Schneider. – 1998. – No 190. – 28 p.
6. Tugai Yu., Tugai I. A combined method for study of ferroresonance processes in voltage transformer. – 2014 IEEE Int.Conf.on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS – 2014): Proc. of the Int. Conf. – Pp. 71–73.

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 27.07.2016