

## МОДЕЛЮВАННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСУ В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ СТАРІННЯ СТАЛІ

Ю.І.Тугай<sup>1</sup>, канд.техн.наук, О.Б.Бесараб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,  
e-mail: [tugav@ied.org.ua](mailto:tugav@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,  
e-mail: [alexfea@mail.ru](mailto:alexfea@mail.ru)

*Трансформатори напруги є одним з основних джерел інформації, що необхідна для оптимального керування режимами електроенергетичних систем. Метою виконаних досліджень було уточнення оцінки можливості виходу трансформаторів напруги з ладу внаслідок ферорезонансних процесів. Для цього розглянута задача підвищення адекватності моделювання процесів в нелінійному електричному колі шляхом врахування зміни властивостей феромагнітного осердя під час експлуатації. Цифрове моделювання процесів старіння виконується на моделі Джилса-Атернона із врахуванням явища гістерезису та реальних ємностей обладнання. Показано, що з плином часу зона небезпечних параметрів має тенденцію до розширення, і тому на діючих підстанціях реальної електричної мережі перевірки необхідно періодично повторювати. Бібл. 7, рис. 3.*  
**Ключові слова:** ферорезонанс, моделювання, трансформатор напруги, старіння сталі.

Задача керування електроенергетичними системами вимагає достовірної та своєчасної інформації про поточні параметри режиму. Основним джерелом цієї інформації є вимірювальні трансформатори напруги та струму. Відмова чи uszkodження цих трансформаторів може стати причиною системної аварії з перервою електропостачання на тривалий час та великими витратами на ліквідацію наслідків. З практики експлуатації відомо, що основною причиною виходу трансформаторів напруги (ТН) з ладу є виникнення ферорезонансних процесів (ФРП). Проблемам виявлення та попередження ФРП в ТН присвячена значна кількість робіт вітчизняних та закордонних авторів [2,3,4,6,7], однак до цього часу мало вивченим залишається питання впливу на ФРП зміни характеристик під час експлуатації ТН.

На практиці з метою передбачення ФРП, як правило, використовують статичні області їхнього існування [3] або методи математичного моделювання [2,4,6]. В першому випадку результати мають скоріше якісний характер. Другий спосіб дозволяє отримати більш точний прогноз поведінки ферорезонансного кола. Однак, зазвичай автори при формуванні моделей для дослідження ФРП у розподільчих пристроях (РП) підстанцій з ТН здійснюють значні спрощення, зокрема, використовують усереднені характеристики, нехтуючи відхиленнями.

Найбільш складною частиною математичної моделі для дослідження ФРП у РП є модель ТН. При моделюванні нелінійних індуктивних елементів, яким є ТН, зазвичай застосовують основну криву намагнічування, що представляє собою геометричне місце вершин гістерезисних циклів при перемагнічуванні. В даній роботі використана характеристика намагнічування ТН НКФ-330 з апроксимацією функцією арктангенса, отримана із використанням експериментальних даних [4].

Важливим є питання визначення діапазону можливого відхилення параметрів характеристики намагнічування в умовах експлуатації. Внаслідок втрат в сердечнику, а також виділення тепла в обмотках відбувається нагрівання магнітопроводу. Підвищення його температури упродовж тривалого часу спричиняє структурні зміни матеріалу – старіння, в результаті чого відбувається погіршення магнітних властивостей електротехнічної сталі магнітопроводів. Трансформатори напруги типу НКФ виготовляють із текстурованої трансформаторної сталі марки Э330А, для якої дані про процес старіння наведені в [5]. На рис. 1 показані характеристики намагнічування ТН марки НКФ-330 :

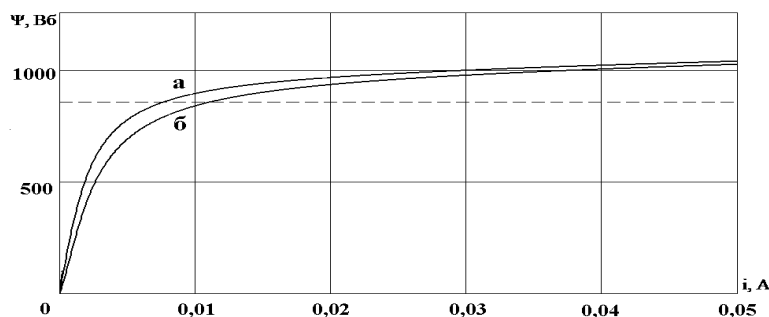


Рис. 1

а – для нового ТН; б – коригована з урахуванням процесу старіння ТН після 5 років експлуатації.

Дослідимо вплив старіння трансформаторної сталі на перебіг процесів в ТН при комутаціях в РП підстанції, яка має елегазові чи повітряні вимикачі з ємнісними дільниками напруги та електромагнітні ТН НКФ-330. З урахуванням глухого заземлення нейтралі, а також однофазного виконання ТН, можна скориста-

тися однофазною схемою заміщення роз-подільного пристрою (рис. 2), де:  $e(t)$  – електрорушійна сила енергосистеми;  $C_B$  та  $C_{Ш}$  – еквівалентні ємності дільників вимикачів і системи шин, відповідно;  $R_{BH}$  та  $R_{HN}$  – активні опори обмоток ТН високої та низької напруг відповідно;  $L_{BH}$  та  $L_{HN}$  – індуктивності обмоток ТН високої та низької напруг відповідно;  $n_{BH} \frac{d\varphi}{dt}$  та  $n_{HN} \frac{d\varphi}{dt}$  – електрорушійні сили обмоток ТН високої та низької напруг відповідно;  $R_H$  – опір навантаження ТН.

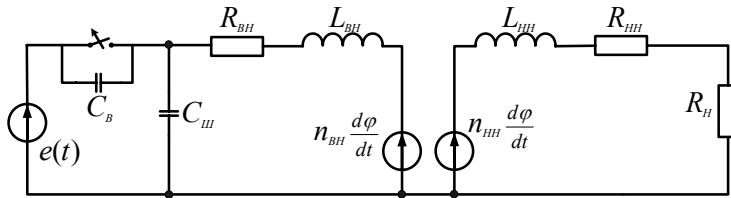


Рис. 2

Моделювання процесів виконувалося із врахуванням явища гістерезису за допомогою моделі Джилса-Атертона [1,7]. Основою моделі є безгістерезисна крива, яка представляє собою залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. Але додатково в даній моделі було враховано зміну величини коерцитивної сили, яка викликана процесами старіння. Було проведено дві серії розрахункових експериментів, відповідно для нового ТН та через 5 років експлуатації.

В серіях еквівалентна ємність дільників напруги вимикачів варіювалася у діапазоні 300÷3000 пФ, а ємність системи шин – 300÷8000 пФ. Напряга джерела живлення була прийнята на рівні 1,05 від номінальної, навантаження ТН прийнято 400 Вт, що відповідає граничному значенню у класі точності 0,5.

На рис. 3 графічно представлено результати проведеного моделювання: діюче значення струму первинної обмотки ТН в залежності від ємностей шин та дільників вимикачів (рис. 3, а відповідає новому ТН; рис. 3, б – ТН після 5 років експлуатації).

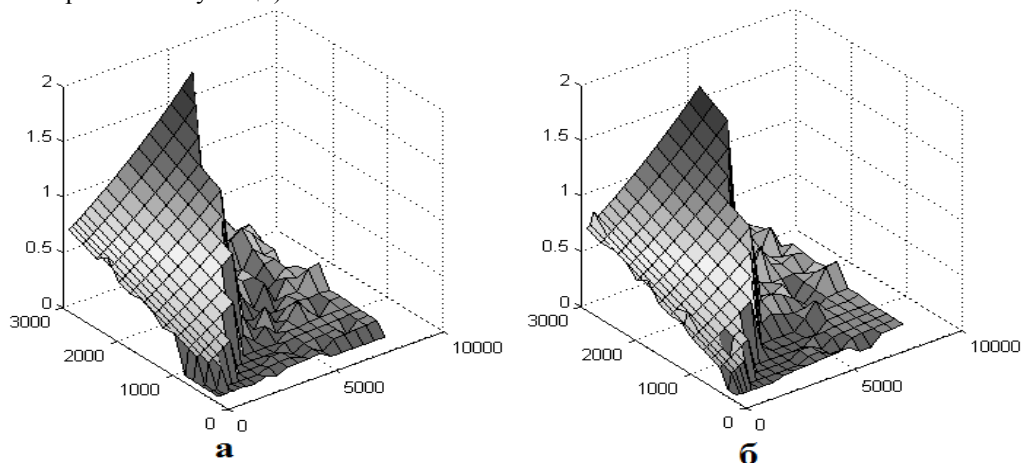


Рис. 3

Результати моделювання показують певне розширення області існування ФРП. Особливо це важливо у випадку близькості параметрів ферорезонансного кола до границь ферорезонансної області. Можна очікувати, що при збільшенні терміну експлуатації вплив старіння сталі на результати моделювання ФРП буде більш вагомим.

**Висновок.** Встановлено, що явище старіння електротехнічної сталі призводить до розширення області існування небезпечних ферорезонансних процесів у розподільчих пристроях з електромагнітними трансформаторами напруги електричних мереж високої напруги. Хоча це розширення порівняно незначне, але при наближенні до границь ферорезонансної області може спричинити виникнення ферорезонансного процесу на підстанціях, де він раніше не спостерігався.

У подальшому доцільним є виконання досліджень впливу інших факторів на криву намагнічування ТН і відповідно на характер протікання ФРП: відхилення в технологічних процесах, наявність зазорів, виконання ремонтів та ін.

1. Амелин С.А., Новиков А.А., Строев К.Н., Строев Н.Н. Модификация модели Джилса-Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков // Электричество. – 1995. – №11. – С. 60–63.
2. Бесараб О.Б., Тугай Ю.І. Моделювання ферорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – Вип. 30. – С. 87–90.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шидловський А.К., Гашімов А.М., Дмитрієв С.В. Виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги та запобігання їм. – Київ: ДП НЕК “Укренерго”, 2009. – 47 с.
4. Кадомская К.П., Лантев О.И. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения // Новости электротехники. – 2006. – Вып. 6(42). – С. 2–5.
5. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов // Наука и технологи. – М., 2000. – 224 с.

6. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование феррорезонансных процессов с учетом варьирования вебер-амперной характеристики трансформаторов напряжения // Электроэнергетичні та електромеханічні системи: збірник наукових праць. – 2012. – № 736. – С. 123–132.
7. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – Pp. 48–60.

УДК 621.311.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА СТАРЕНИЯ СТАЛИ

Ю.И. Тугай<sup>1</sup>, канд.техн.наук, А.Б. Бесараб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

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

<sup>2</sup> – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: [alexfea@mail.ru](mailto:alexfea@mail.ru)

*Трансформаторы напряжения являются одним из основных источников информации, которая необходима для оптимального управления режимами электроэнергетических систем. Целью выполненных исследований было уточнение оценки возможности выхода трансформаторов напряжения из строя вследствие феррорезонансных процессов. Для этого рассмотрена задача повышения адекватности моделирования процессов в нелинейной электрической цепи путем учета изменения свойств ферромагнитного сердечника во время эксплуатации. Цифровое моделирование процессов старения выполнялось на модели Джилса-Атертона с учетом явления гистерезиса и реальных емкостей оборудования. Показано, что с течением времени зона опасных параметров имеет тенденцию к расширению и поэтому на действующих подстанциях реальной электрической сети проверки возможности возникновения феррорезонанса необходимо периодически повторять. Библи. 7, рис. 3.*

**Ключевые слова:** феррорезонанс, моделирование, трансформатор напряжения, старение стали.

## SIMULATION OF FERRORESONANCE IN VOLTAGE TRANSFORMERS WITH THE EFFECT OF STEEL AGEING

Yu.I. Tugai<sup>1</sup>, O.B. Besarab<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [alexfea@mail.ru](mailto:alexfea@mail.ru)

*The voltage transformer is one of the main sources of information, which is necessary for optimal control in the electric power systems. Its outage as result of ferroresonance process provokes severe emergency state with significant harm. So the study of this process is very important and urgent task. But the traditional analytic approach gives the qualitative not quantitate result rather. Therefore, the digital simulation is more useful for this goal. The adequate simulation is necessary for the hazard identification. It should be remembered that ferroresonance process is highly sensitive to different factors. So effect of change of the magnetization curve as result of the aging steel should be taken into account too. The influence of steel aging on the ferroresonant process was analyzed by the Giles-Atherton model and the expanding of hazardous zone was shown. Therefore, the dangerous process may appear in unexpected place and it's necessary to check the emergence of ferroresonance condition in substation switchgear periodically. References 7, figures 3.*

**Keywords:** ferroresonance, simulation, voltage transformer, steel ageing.

1. Amelin S.A., Novikov A.A., Stroev K.N., Stroev N.N. Modification of the model Giles-Atherton to account for the frequency properties of ferromagnetic // Elektrichestvo. – 1995. – № 11. – Pp. 60–63. (Rus)
2. Besarab O.B., Tugai Yu.I. Modeling ferroresonance process in transformer voltage direct method // Pratsi Instytutu Elektrodynamicy Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2011. – Vol. 30. – Pp. 87–90. (Ukr)
3. Kuznetsov V.H., Tugai Yu.I., Shydlovskiy A.K., Hashimov A.M., Dmytriev Ye.V. Identification and prevent of ferroresonance processes in electrical networks of high voltage. – Kyiv: GP "Ukrenerho", 2009. – 47 p. (Ukr)
4. Kadomskaya K.P., Laptev O.I. Antiresonance voltage transformers. Efficiency of application // Novosti elektrotehniki. – 2006. – Vol. 6 (42). – Pp. 2–5. (Rus)
5. Kazadzhan L.B. The magnetic properties of electrical steels and alloys // Nauka i tekhnologiya. – Moskva: 2000. – 224 p. (Rus)
6. Saenko L., Popov S. Research ferroresonant processes taking into account varying weber-ampere characteristic voltage transformers // Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy. – 2012. – № 736. – Pp. 123–132. (Rus)
7. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – Pp. 48–60.

Надійшла 17.02.2014