

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ВІЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

О Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Никонець О.Л., 2012

Вперше в електроенергетиці одержала інструмент для оцінювання кількісних показників електромагнітних процесів у довільній точці обмотки ВН трансформатора за дії на нього з боку мережі вільної складової внутрішніх перенапруг.

Ключові слова: трансформатор, математична модель, внутрішні перенапруги, функція передачі, частотна характеристика.

First power obtained a tool to assess the quantitative indications of electromagnetic processes at any point winding high voltage of the transformer for the actions against it by the network component of the free internal over voltages.

Key words: transformer, mathematical model, internal overvoltage, transfer function, frequency response.

Постановка проблеми

Протиріччя між традиційними науковими підходами до обґрунтування необхідного рівня ізоляції, що узагальнені в чинній нормативній базі [1–3], та досвідом експлуатації трансформаторів [4], яке полягає в неможливості пояснити причини масового пошкодження повздовжньої ізоляції обмоток за дії внутрішніх перенапруг з боку мережі, можуть бути усуненими, якщо врахувати наявність фізичного явища внутрішнього резонансу [5], що здебільшого спричиняє пошкодження трансформаторів.

Характер та кількісні характеристики електромагнітних процесів в обмотках трансформаторів до цих пір залишаються невідомими через практичну неможливість їх ресстрації. Єдиний можливий шлях до вивчення особливостей прояву явища внутрішнього резонансу – синтез математичних моделей, які містять моделі всіх елементів конструкції (ізоляції, обмоток, магнітопроводів) [6].

Аналіз сучасних досліджень та публікацій

Перші спроби створення моделей трансформаторів, які містять всі елементи їх конструкції виконані в [6, 7]. Сама постановка проблеми синтезу математичних моделей, за допомогою яких з'являється можливість дослідження електромагнітних процесів в обмотках трансформаторів, виявилася плідною, бо дала змогу сформувати принципово нову програму наукових досліджень [8], часткова реалізація якої [9–15] дала принципово нові наукові результати.

Задача досліджень

Оцінка адекватності відтворення моделлю частотних характеристик та функцій передачі, що гарантує достовірність відтворення реальних електромагнітних процесів в довільній точці обмотки ВН трансформатора на подальших етапах досліджень.

Виклад основного матеріалу досліджень

Задекларована модель [6], отримана як розв'язок системи комплексних рівнянь із 434 невідомими. Еталоном, для порівняння результатів, що отримані на математичній моделі [6], були використані результати експериментальних досліджень [9, 10, 13–15]. Відібрані результати, які ілюструють основні особливості прояву явища внутрішнього резонансу, що описані в [5, 9, 10, 13–15]. Розглянуто резонанс між індуктивністю трансформатора та ємностями його головної ізоляції [5], резонанс між обмотками

трансформатора та індуктивністю його магнітної системи [14] та резонанс в автотрансформаторному режимі через невідповідності відношення опорів розсіювання частин обмотки ВН відношенню витків цих частин [13].

Дослідженнями [15] обґрунтована необхідність створення окремої моделі для кожної конкретної точки обмотки ВН. Оцінена адекватність двох моделей для варіантів відпайок з обмотки ВН, що відповідають 47 та 92 % довжини обмотки ВН. Це дозволить вивчати з використанням моделі особливості характеру електромагнітних процесів для різних схем з'єднання обмотки ВН трансформатора. Моделі мають спільні точки (фазні виводи обмоток, нейтральний вивід обмотки ВН), відносно яких параметри режиму мають бути однаковими. Порівняння отриманих даних на резонансних частотах з експериментом для функції передачі між значеннями напруги в нейтралі обмотки ВН та значенням напруги, що прикладена до фазних виводів А,В,С ВН для моделі з відпайкою 92 % в режимі короткого замикання обмотки НН по частоті дає похибку +10 %, по значенню кратності перенапруги -9 %, а для режиму неробочого ходу обмотки НН – відповідно -16 % та +25 %. Для моделі з відпайкою 47 % – відповідно -11 % і +21 % та -11 % і +54 %.

Для демонстрації адекватності моделей в повному діапазоні частот на рис. 1–3 зроблено порівняння функцій передачі між значеннями напруг на відпайках та значенням напруги, що прикладена до фазних виводів ВН А, В, С.

На рис. 1 наведено порівняння функцій передачі між значенням напруги на відпайці 92 % обмотки ВН та значенням напруги, що прикладена до фазних виводів ВН А,В,С. Рис. 1 ілюструє особливості внутрішнього резонансу між індуктивністю трансформатора та ємністю його головної ізоляції. У режимі короткого замикання (рис. 1, а) як індуктивність трансформатора виступає індуктивність опору розсіювання, а в режимі неробочого ходу (рис. 1, б) – індуктивність всієї магнітної системи, що спричинило різні значення резонансної частоти.

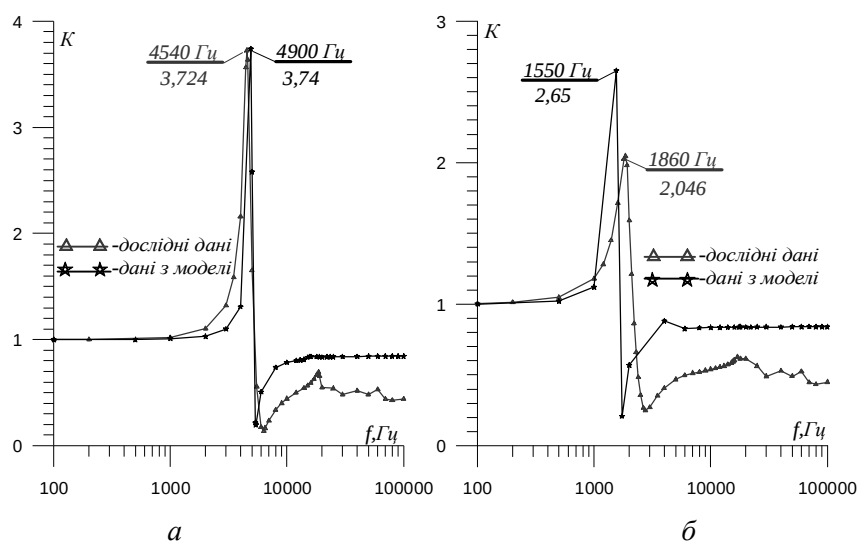


Рис. 1. Порівняння функцій передачі між значеннями напруги на відпайці 92 % обмотки ВН та значенням напруги, що прикладена до фазних виводів ВН :
а – режим короткого замикання обмотки НН; б – режим неробочого ходу обмотки НН

Як бачимо з рис. 1 похибка моделі на резонансних частотах становить 8–17 % за частотою, та 0,4–29,5 % – за кратністю. Аналогічний дослід для варіанта ділення обмотки на 47 та 53 % наведено на рис. 2. Похибка становить 23–40 % за частотою та 6–23 % за кратністю.

На рис. 3, 4 наведено порівняння функцій передачі між значенням напруги на вільних виводах трансформатора по відношенню до приведеної напруги, що прикладена до однієї з частин обмотки ВН (еквівалент режиму неробочого ходу автотрансформатора). Особливістю внутрішнього резонансу в цьому випадку є те, що резонанс відбувається між індуктивністю магнітної системи трансформатора та ємнісним значенням опору розсіювання вільної частини обмотки.

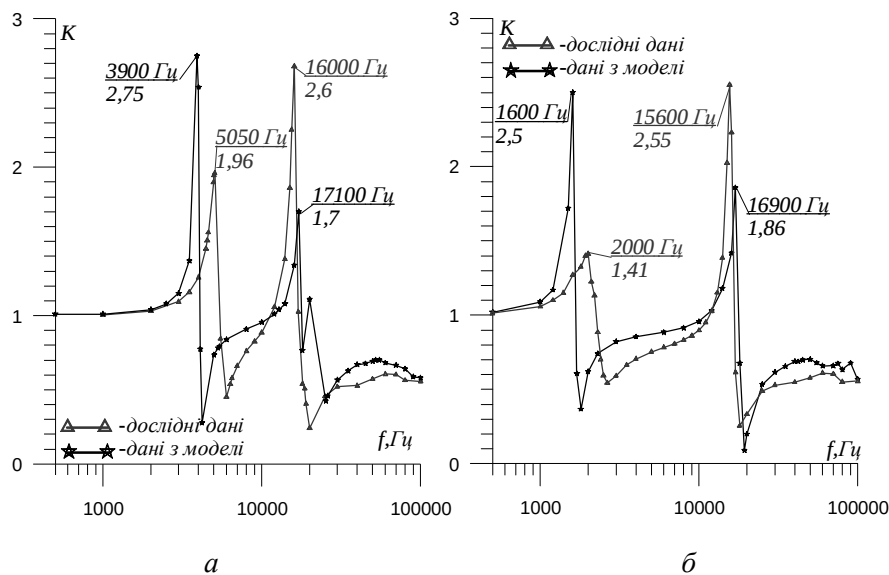


Рис. 2. Порівняння функцій передачі між значеннями напруги на відпаїці 47 % обмотки ВН та значенням напруги, що прикладена до фазних виводів ВН :
а – режим короткого замикання обмотки НН; б – режим неробочого ходу обмотки НН

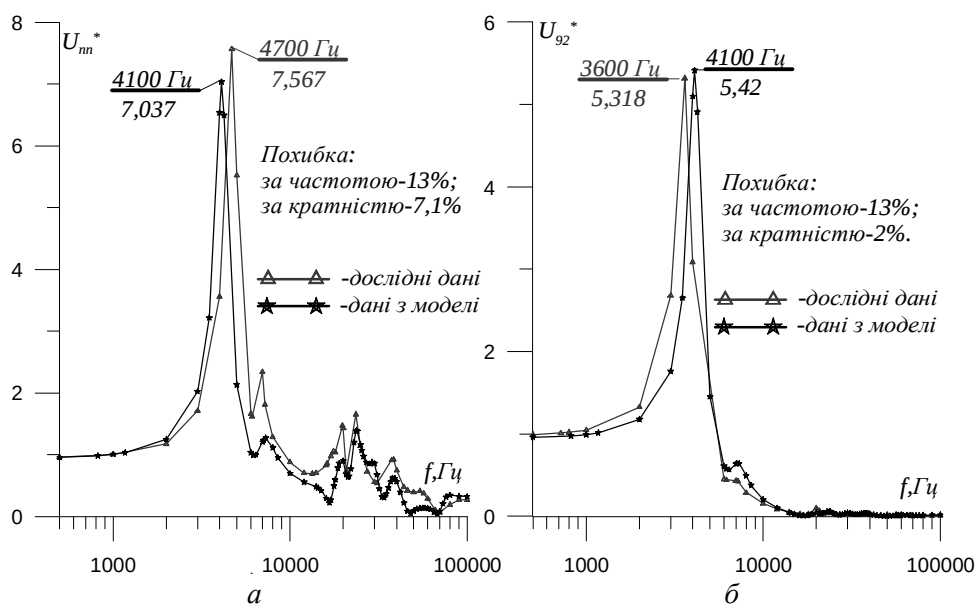


Рис. 3. Порівняння функцій передачі між значенням напруги на вільних виводах трансформатора по відношенню до приведеної напруги, що прикладена до однієї з частин обмотки ВН для варіанта ділення обмотки ВН та частини 92 і 8 %:
а – на виводах обмотки НН; б – на виводах 92 % частини обмотки ВН

Для варіанта ділення обмотки ВН та частини 92 і 8 % та прикладенні напруги на 8 % частину, похибки становлять за частотою в момент резонансу 13 %, а за кратністю 2–7 % (рис. 3).

Для варіанта ділення обмотки ВН та частини 47 і 53 % та прикладенні напруги на 47 % частину, похибки становлять за частотою 6–9 %, а за кратністю 49–54 % (рис. 4).

На рис. 5, 6 наведено порівняння функцій передачі між значенням напруги на обмотці НН, та значенням напруги, прикладеної до додаткового виводу обмотки ВН, що ділить обмотку на частини, за умови що протилежні кінці обмотки ВН всіх фаз заземленні.

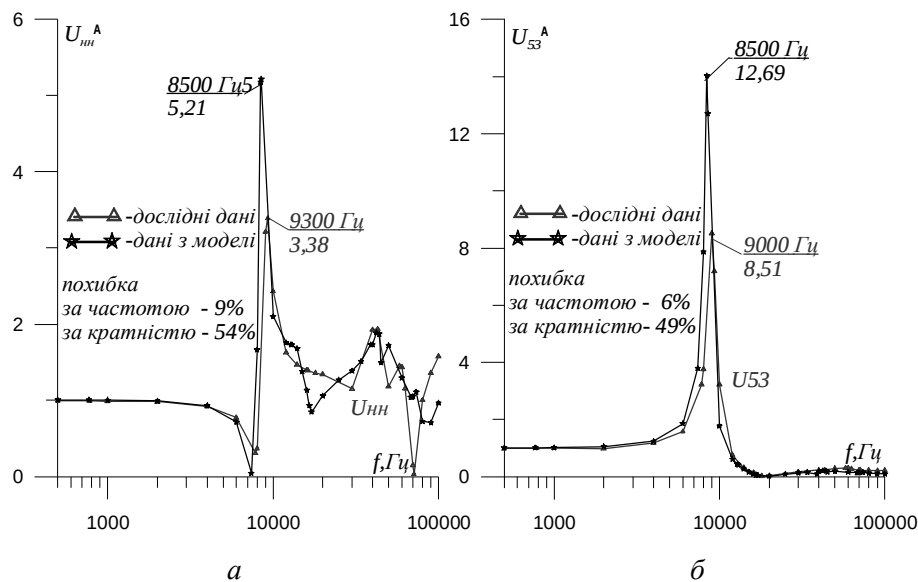


Рис. 4. Порівняння функцій передачі між значенням напруги на вільних виводах трансформатора по відношенню до приведеної напруги, що прикладена до однієї з частин обмотки ВН для варіанта ділення обмотки ВН та частини 47 і 53 %: а – на виводах обмотки НН; б – на виводах 53 % частини обмотки ВН

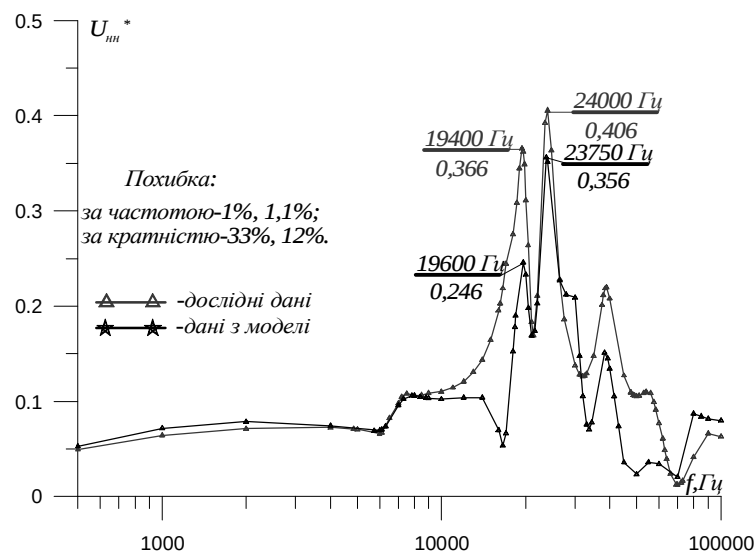


Рис. 5. Порівняння функції передачі між значенням напруги на обмотці НН, та значенням напруги, прикладеної до додаткового виводу обмотки ВН Для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 та 8 % за умови, що протилежні кінці обмотки ВН всіх фаз заземлені

Для варіанта ділення обмотки ВН на частини 92 та 8 % (рис. 5) похибка моделі за частотою становить 1–1,1 %, а за кратністю 12–33 %.

Для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 та 53 % (рис. 6) похибка моделі за частотою становить 2 %, а за кратністю 8 %.

Отже, задекларована вищезгадана модель якісно відтворює всі електромагнітні процеси, які відбуваються в обмотках трансформатора. Що стосується кількісного аспекту процесу, то максимальна зареєстрована похибка не перевищує 50 %, тобто кількісні показники, отримані за допомогою моделі можуть бути використані, як перше наближення для обґрунтування розрахункових параметрів на стадіях проектування, випробувань нового обладнання та експлуатації інакше.

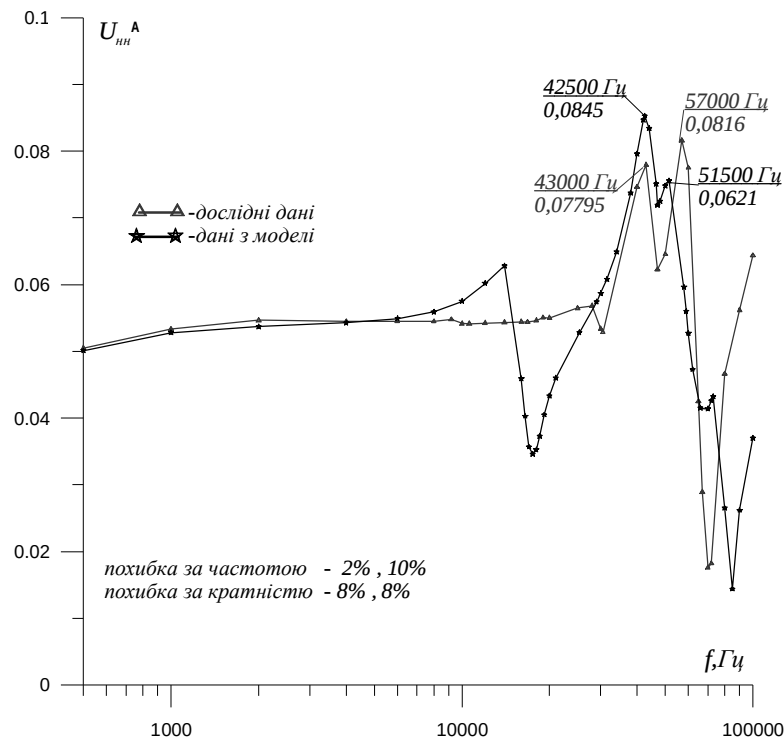


Рис. 6. Порівняння функції передачі між значенням напруги на обмотці НН, та значенням напруги, прикладеної до додаткового виводу обмотки ВН Для варіанта ділення обмотки ВН на частини 47 та 53 % за умови, що протилежні кінці обмотки ВН всіх фаз заземлені

Оцінка адекватності відтворення функцій передачі математичною моделлю – необхідна, але не достатня умова для остаточного висновку. Важливо, на підставі проведення фізичних або математичних дослідів отримати уяву щодо фізичних енергетичних процесів, які відбуваються в трансформаторі за дії на нього вільних складових внутрішніх перенапруг. Розуміння фізичних явищ, що відбуваються, дає змогу досліднику впевненіше планувати подальші етапи досліджень. Інакше кажучи, є бажання заглянути в “чорну скриньку”. Реалізація цього бажання передбачає виконання таких етапів:

1. За частотними характеристиками об’єкта, або його частин синтезується модель відповідного двополусника.

2. Визначаються залежності значення активного, реактивного та повного опору двополусника від частоти прикладеної напруги.

3. Розраховується залежність повної, активної та реактивної потужності об’єкта чи його частин від частоти.

4. Виконуються на математичній моделі об’єкта розрахунки за пунктом 3.

5. На підставі порівняння результатів п. 3 та п.4 робиться висновок щодо адекватності моделі.

Приклад реалізації цього алгоритму для дослідів рис. 5, 6 наведено на

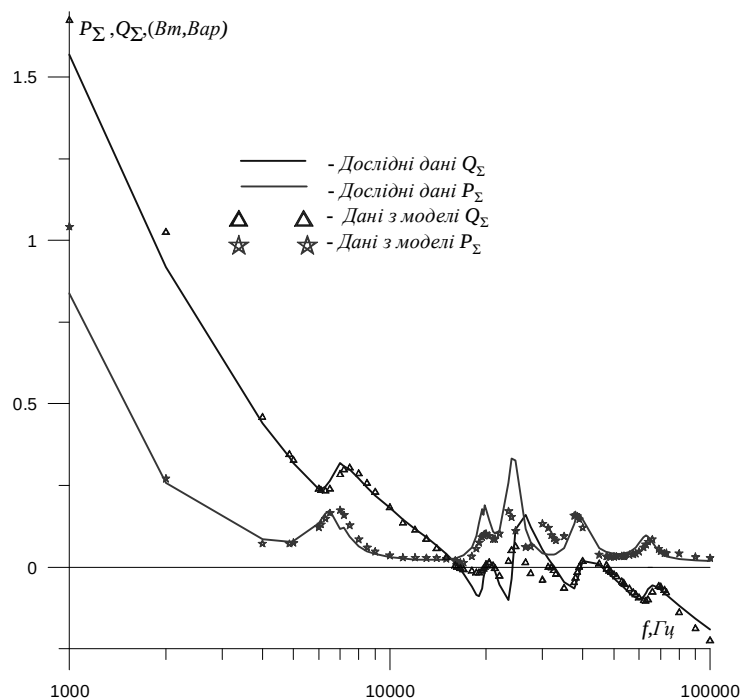


Рис. 7. Складові потужностей джерела живлення для дослідів рис. 5

рис. 7, 8. Суцільними лініями на рис. 7, 8 показані залежності активної (P_{Σ}) та реактивної (Q_{Σ}) потужності джерела живлення, отримані за фізичними дослідженнями на трансформаторі, а значками представлені дані P_{Σ} та Q_{Σ} моделі, адекватність якої перевіряються.

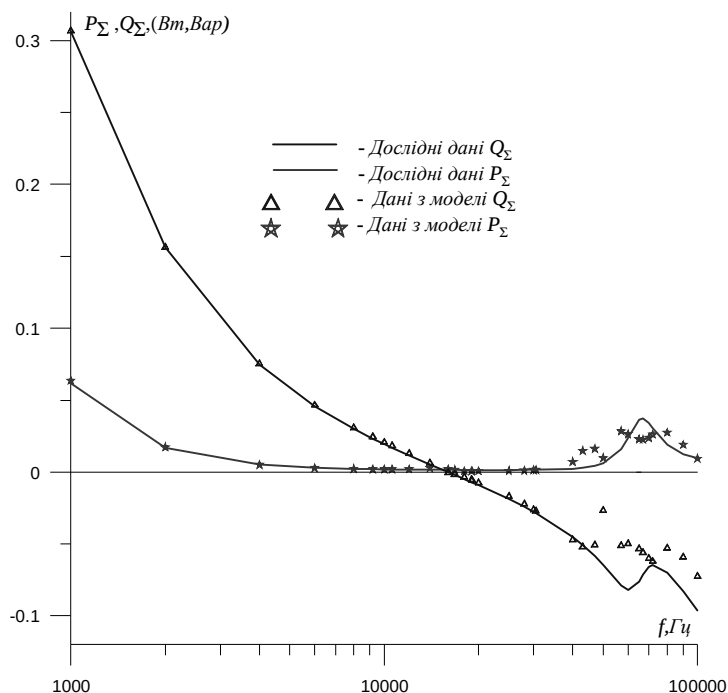


Рис. 8. Складові потужностей джерела живлення для дослідів рис. 6

Висновки

Вперше електроенергетика отримала інструмент для оцінки кількісних показників електромагнітних процесів в довільній точці обмотки ВН трансформатора за дії на нього від мережі вільної складової внутрішніх перенапруг.

1. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с. 2. ГОСТ 1516.2-97, Межгосударственный стандарт, Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше, Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с. 3. ГОСТ 1516.3-96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. 4. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // Электричество. – 2005. – № 5. 5. Никонець Л.О., Федів Є.І, Молнар М.М. Фізичні явища в електрообладнанні з обмотками високої напруги // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 3. – С. 49–52. 6. Никонець Л.О., Бучковський І.Р., Сабат М.Б. Математична модель трифазного трансформатора для частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № : Електроенергетичні та електро-механічні системи. (стаття в цьому збірнику). 7. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонець О.Л. Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі // Новини енергетики– 2010. – № 3. – С. 40–46. 8. Никонець Л.О., Федів Є.І, Молнар М.М. Стратегія істотного підвищення надійності роботи електрообладнання 6–35 кВ з обмотками високої напруги // Зб. наук. праць Донецького національного технічного університету. – 2008. – Вип. 8(140). – С. 38–41. 9. Никонець Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р. Распределение свободной составляющей нулевой последовательности внутренних перенапряжений вдоль обмотки 6–35 кВ соединенной в «звезду» трансформатора распределительной сети при

внутреннем резонансе в системе «обмотка – изоляция» // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 38–43. 10. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Бучковський І.Р., Сабат М.Б. Распределение свободной составляющей нулевой последовательности внутренних перенапряжений вдоль обмотки соединенной в «треугольник» трансформатора или автотрансформатора распределительной сети при внутреннем резонансе в системе «обмотка – изоляция» // Новини енергетики. – 2010. – № 11. – С. 41–46. 11. Маліновський А.А., Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Никонец О.Л., Гуцин Є.Ю., Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустаткування з обмотками високої напруги за дослідними частотними характеристиками // Новини енергетики. – 2011. – № 5. – С. 34–39. 12. Маліновський А.А., Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Никонец О.Л., Гуцин Є.Ю. Методи моделювання втрат в трансформаторах за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення // Новини енергетики. – 2011. – № 11. – С. 36–43. 13. Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Никонец О.Л. Вплив режиму роботи трансформатора на частотні характеристики обмоток та їх частин // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. – № 707: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 15–21. 14. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Венгер Владимир П., Венгер Виктор П. Характеристики холостого хода трансформатора для частот свободной составляющей внутренних перенапряжений сети // Новини енергетики. – 2012. – № 2. – С. 43–48. 15. Никонец Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р. Метод експериментального определения сопротивлений рассеивания частей обмотки высокого напряжения трансформатора // Новини енергетики. – 2012. – № 3. – С. 44–48

УДК 621.311

Ю.Л. Саенко, А.С. Попов

Государственное высшее учебное заведение
Приазовский государственный технический университет,
кафедра ЭПП

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ВАРИИРОВАНИЯ ВЕБЕР-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

© Саенко Ю.Л., Попов А.С., 2012

Рассмотрено влияние погрешности представления вебер-амперной характеристики на результаты исследований феррорезонансных процессов. Оценено влияние варьирования характеристика намагничивания трансформаторов напряжения на диапазон существования феррорезонанса.

Ключові слова: феррорезонансний процес, трансформатор напруги, перенапруга, характеристика намагничивания.

The influence of infelicity of representation saturable characteristic on results of the investigation of ferroresonance processes is considered. The effect of varying of the magnetization characteristic of voltage transformer on the range of existence of ferroresonance is estimated.

Key words: ferroresonance processe, voltage transformer, overvoltage, magnetization characteristic.

Постановка задачи

Феррорезонанс является сложным и достаточно опасным электрическим явлением, которое может возникать в любой сети, содержащей емкость и нелинейную индуктивность. Многолетние исследования этой проблемы показали, что режим феррорезонанса может сопровождаться