

УДК 621.311

Ю.Л. САЕНКО (д-р техн. наук, проф.), А.С. ПОПОВ  
Приазовский государственный технический университет  
sayenko\_y\_edpstu.edu, artempopov9@gmail.com

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НТМИ-6-66, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ

В статье приведены основные характеристики измерительного трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66, необходимые для моделирования феррорезонансных процессов: кривая намагничивания и активные потери в сердечнике трансформатора. Приведены результаты измерения активных потерь в стали трансформатора. Рассмотрены способы аппроксимации кривой намагничивания.

В сетях средних классов напряжения, эксплуатируемых с изолированной нейтралью, наблюдаются частые повреждения измерительных трансформаторов напряжения (ТН) типов НТМИ, ЗНОМ, ЗНОЛ вследствие термического повреждения первичной обмотки. Считается, что причиной повреждения ТН является возникновение в сети опасных феррорезонансных колебаний [1-3].

При исследовании феррорезонансных процессов (ФРП) особое внимание следует уделять созданию адекватной математической модели исследуемой сети.

Ранее анализ феррорезонансных явлений основывался на аналитических методах [4]. Решение представлялось или в графическом виде, или расчетная схема упрощалась до такой степени, чтобы сделать возможным аналитическое решение. При этом принятые допущения существенно снижают достоверность результатов, а в некоторых случаях могут привести к ошибочным выводам.

Современный наиболее распространенный подход к анализу феррорезонансных схем основан на составлении системы дифференциальных уравнений, описывающих заданную схему, с последующим их решением [5]. Из этого следует, что создание адекватной математической модели является актуальной и первоочередной задачей.

**Ветвь намагничивания ТН.** При исследовании ФРП особо тщательно следует моделировать кривую намагничивания (вебер-амперную характеристику) ТН. Данная характеристика зачастую определяется на промышленной частоте, и поэтому в ней неизбежно учитывается индуктивность рассеивания первичной обмотки [6]. Кривая намагничивания фазы ТН типа НТМИ-6-66, заимствованная из [7], приведена на рис.1.. Данная характеристика включает индуктивность рассеивания первичной обмотки.

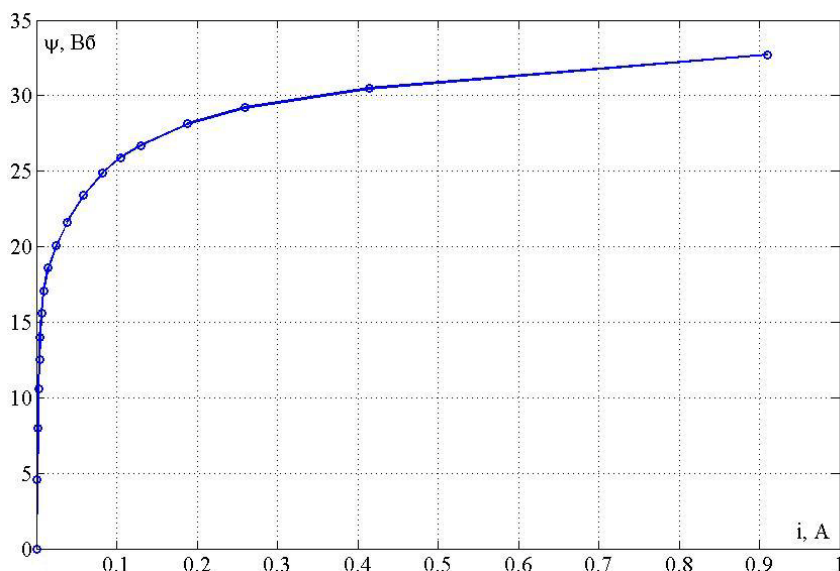


Рисунок 1 – Кривая намагничивания фазы ТН типа НТМИ-6-66

Одна из наиболее распространенных схем замещения ТН, используемых для анализа ФРП, представлена на рис. 2. В ней  $R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки,  $R_0$  – активное сопротивление, моделирующее активные потери в стали,  $X_0$  – результирующая нелинейная индуктивность намагничивающего контура. В данной схеме нагрузка вторичной обмотки ТН и обмотки разомкнутого треугольника не учитывается. Отметим, что активное сопротивление первичной обмотки равно 1200 Ом.

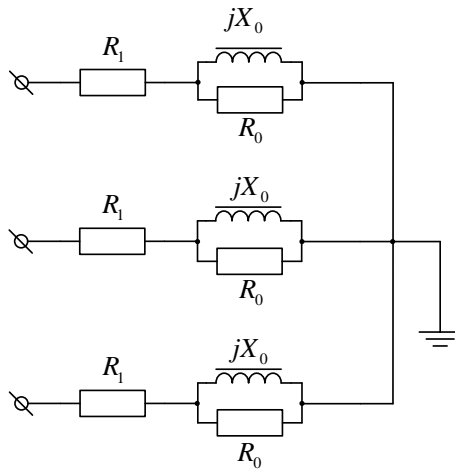


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения ТН

Известно, что потери в стали нелинейно зависят от приложенного напряжения, а их величина определяется площадью петли гистерезиса. Для определения зависимости потерь в стали от напряжения на ТН были произведены соответствующие измерения. Для этого была собрана схема, общий вид которой представлен на рис.3. Схема состоит из источника питания (ЛАТР), измерительного шунта (токовый сигнал цепи), двухлучевого электронного осциллографа (Agilent DS03202A) и ТН. Опыты проводились со стороны обмотки низкого напряжения (НН). Структурная схема определения потерь в стали по исходным данным измерений представлена на рис.4. Ввиду простоты и очевидности последней детальное разъяснение не приводится. Экспериментальная зависимость потерь в сталь от напряжения приведена на рис. 5.

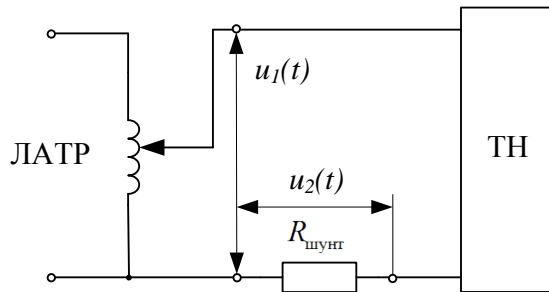


Рисунок 3 – Схема для определения потерь в стали ТН

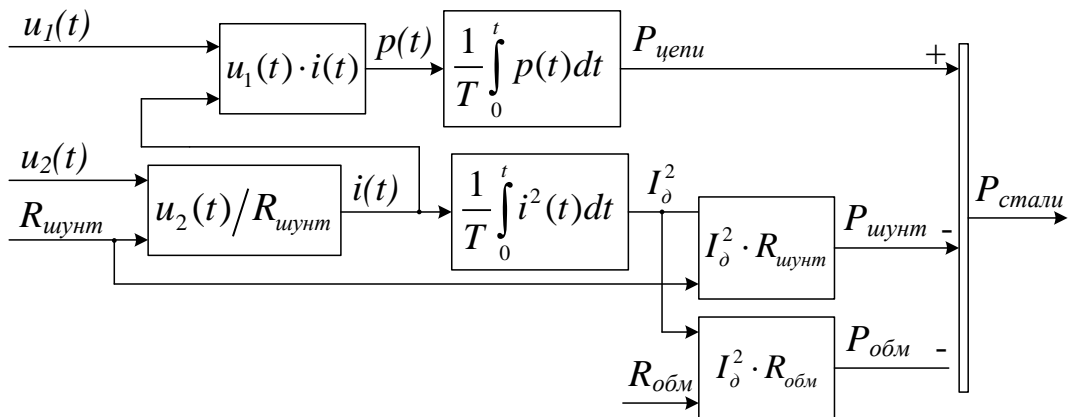


Рисунок 4 – Структурная схема определения потерь в стали

Погрешность измерения при этом не превышает 6% и определяется погрешностью осциллографа и измерительного моста. При оценке погрешности не был произведен учет поверхностного эффекта и явления увеличения сопротивления шунта с ростом температуры. Чтобы минимизировать погрешность от последнего явления измерение омического сопротивления шунта и обмотки НН производилось после регистрации каждой конкретной точки. Такая необходимость вызвана тем, что в насыщении ток холостого хода (х.х.) резко растет (в 100-150 раз) и сопротивления начинают «плыть». Потери в стали при номинальном напряжении (57,7 В) составили 4,9 Вт. Добавим, что измерения потерь произведено для всех трех фаз ТН, и результаты достаточно хорошо согласуются.

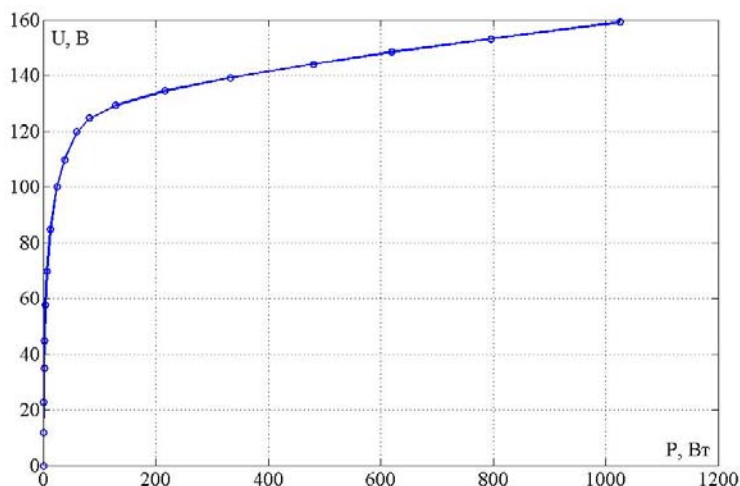


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость потерь в стали от напряжения

На рис.6 представлена экспериментальная осциллограмма тока холостого хода, снятая при номинальном напряжении. Здесь несинусоидальность – результат не столько насыщения стали (рабочая индукция ТН данного типа находится в пределах 0,92-0,95 Тл.), сколько явления гистерезиса. Номинальный ток х.х. составил 0,36 А, коэффициент несинусоидальности при этом составил 31%.

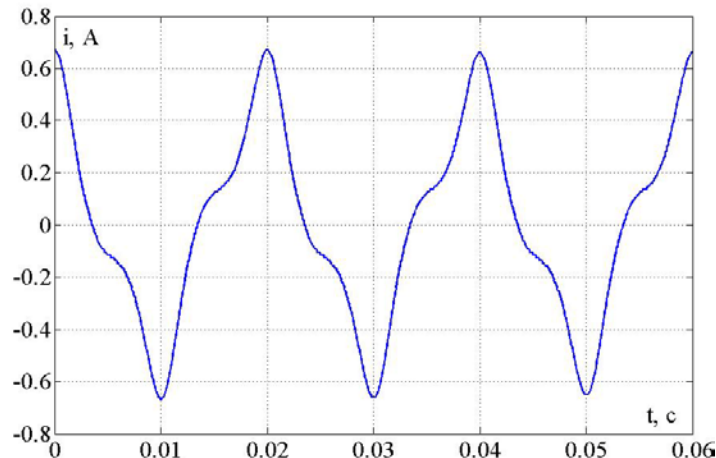


Рисунок 6 – Опытная осциллограмма тока х.х. при номинальном напряжении

Немаловажным является тот факт, что кривые намагничивания отличаются не только для ТН различных типов, но и для однотипных. Это объясняется технологическими отклонениями при сборке магнитопровода, качеством железа и т.д. [8]. Данное обстоятельство требует большого внимания. Так в работе [6] авторы при номинальном токе намагничивания варьируют значение потокоцепления в диапазоне  $-20\% \div +20\%$  номинального. На рис.7 приведены экспериментальная вольтамперная характеристика (ВАХ) трансформатора и расчетные ВАХ, полученные при варьировании потокоцепления при заданном токе намагничивания в диапазоне  $0..+20\%$ . При этом характеристики приведены для действующих значений в относительных единицах (по отношению к номинальным параметрам) для большей наглядности. Из результатов видно, что 20-ти процентный интервал является достаточным. Необходимо отметить, что для большей корректности подобные измерения следует проводить на серии измерительных ТН.

Из приведенных ВАХ видно, что воздействие на ТН даже незначительного перенапряжения ( $2-2,5U_{\phi}$ ) приводит к глубокому насыщению стали и росту тока в обмотке. Повреждения при этом зачастую не наступает мгновенно. Характерным является развитие дефектов в изоляции обмотки ВН с последующим повреждением

последней. В результате средний срок службы ТН не превышает 3-5 лет. Следовательно для ТН опасны не только феррорезонансные явления, но и разного рода коммутационные (в том числе и дуговые) перенапряжения, вызывающее насыщение стали.

Острая проблема с ТН типа НТМИ-6,10-66 началась тогда, когда взамен пятистержневой конструкции (изготавливаемой до 1966 года) стали выпускать конструкцию из трех однофазных трехобмоточных трансформаторов, размещенном в одном баке. В результате такой трансформатор стал дешевле, однако насыщаться он стал даже при незначительном повышении напряжения [9].

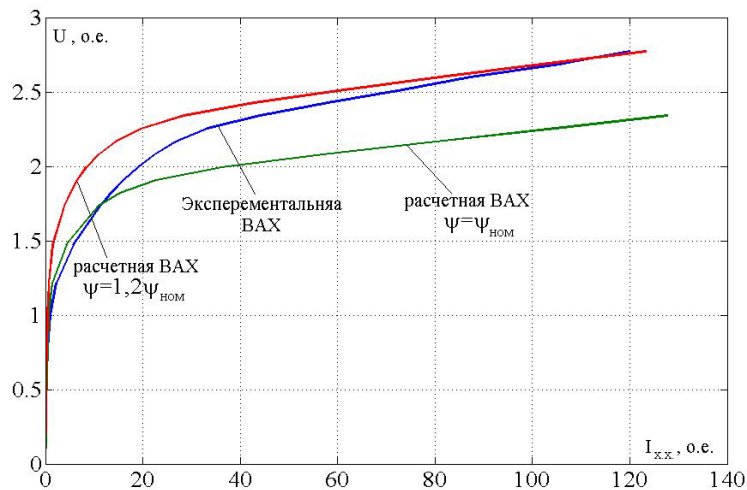


Рисунок 7 – Экспериментальная и расчетные ВАХ ТН

Возвращаясь к вопросу учета активных потерь в стали, авторы отмечают важность и актуальность этого вопроса. Известно, что активные потери в феррорезонансном контуре демпфируют ФРП и при некоторых условиях приводят к срыву феррорезонанса. Этим объясняется эффективность применения нагрузочных резисторов в обмотке ВН, разомкнутого треугольника, нейтрали ТН в борьбе с феррорезонансом. Не учет потерь в стали либо учет их линейными зависимостями приводит к некоторому расширению областей параметров сети возможного феррорезонанса, т.е. к некоторой перестраховке. В тоже время теряется некоторая адекватность математической модели. В частности в недостаточной мере можно проследить за эффективностью мер борьбы с феррорезонансом. Следовательно, для получения полной картины процессов потери в стали следует моделировать нелинейным активным сопротивлением.

**Аппроксимация кривой намагничивания.** Важным вопросом при моделировании нелинейной индуктивности является выбор аппроксимирующей функции. Анализ публикаций, посвященных этому вопросу показал, что наиболее распространенным способом аппроксимации вебер-амперной характеристики является применение степенного полинома вида:

$$\psi(i) = a \cdot i + b \cdot i^n, \quad (1)$$

где  $i$  – ток намагничивания;  $\Psi$  – потокосцепление;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты аппроксимации;  $n=3,5,7,9,11$ . Коэффициенты, принимаемые в зависимости от типа ТН.

Авторы подобных работ утверждают, что погрешность в таком случае не превышает 3-5%. В то же время визуальное сравнение исходной и аппроксимированной функций не вызывает сомнений. Однако простейшие расчеты показывают, что при использовании таких аппроксимирующих функций ток х.х. трансформатора при номинальном напряжении может быть завышен в 4-7 раз, а погрешность 3-5% будет относиться лишь к участку насыщения. Справедливо и обратное – получение заданной точности на линейном участке приводит к недопустимым погрешностям в насыщении.

Достаточно хорошее приближение дает аппроксимирующая функция вида:

$$\psi(i) = a \cdot \arctg(b \cdot i) + c \cdot i, \quad (2)$$

где  $i$  – ток намагничивания;  $\Psi$  – потокосцепление;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты аппроксимации.

Авторы отказались от использования функциональной аппроксимации и прибегли к использованию кусочно-линейной аппроксимации. Положительный опыт использования данного подхода показал, что погрешность результатов определяется лишь дискретностью разбиения кривой. При этом заданная точность обеспечивается на всех участках кривой намагничивания. В процессе произведения расчетов проблем с устойчивостью решения систем дифференциальных уравнений выявлено не было. Отметим, что результаты получены в среде MATLAB.

#### Выводы

1. При расчете феррорезонансных схем особое внимание следует уделять созданию адекватной математической модели сети. Достоверность полученных результатов определяется соответствием между

параметрами реальної мережі і розрахункової схеми заміщення. Також слід відзначити важливість проведення вимірювань в реальних мережах, завдяки яким можна судити про збіг розрахункових результатів з реальними.

Для отримання більш повної картини при моделюванні слід враховувати такі фактори як: несиметрія ТН по фазах, несиметрія фазної ємності, несиметрія джерела живлення і т.д. Великий інтерес також представляють характеристики нових ТН типів НАМИ, НАМИТ, НАЛІ, НТН, які по ряду причин не є загальнодоступними.

2. Не менш ефективним способом підвищення надійності роботи ТН, в порівнянні з застосуванням антирезонансних трансформаторів, є модифікація існуючих моделей типу НТМИ-6,10-66, яка полягає в зменшенні робочої індукції відповідним збільшенням числа витків первинної і вторинної обмоток. При цьому ТН буде менш підвержене насиченню при підвищенні напруги, а зона можливого виникнення феррорезонансу зміститься в область менших ємностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаргородский В.А. Автоколебательный процесс – причина повреждения трансформаторов напряжения / В.А. Шаргородский // Электрические станции. – 1963. – №5. – С. 59-64.
2. Лихачев Ф.А. Схемы подключения дополнительного сопротивления к трансформатору напряжения контроля изоляции / Ф.А. Лихачев // Электрические станции. – 1978. – №12. – С. 75-76.
3. Зихерман М.Х. Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю / Ф.А. Лихачев // Электрические станции. – 1978. – №11. – С. 65-67.
4. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи / П.Н. Матханов. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
5. Дударев Л.Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сети с изолированной нейтралью / Л.Е. Дударев, И.В. Волошек, А.И. Левковский // Электрические станции. – 1991. – №1. – С. 66-71.
6. Кадомская К.П. Повышение надежности электрических сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ / К.П. Кадомская, В.А. Хныков, А.В. Виштибеев // Электрические станции. – 2002. – №3. – С. 47-51.
7. Заболотников А.П. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ. / А.П. Заболотников, К.П. Кадомская, А.А. Тихонов. – Новосибирск, 1993. – 158с.
8. Нугер Б.К. Выбор величины резистора в нейтрали трансформатора напряжения / Б.К. Нугер // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2000. – С. 211-212.
9. Миронов И.А. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ. / И.А. Миронов // Электрические станции. – 2008. – №4. – С. 60-69.

Надійшла до редколегії 11.09.2010

Рецензент: І.П.Заболотний

Ю.Л. САЄНКО, А.С. ПОПОВ  
Приазовський державний технічний університет

Y. SAYENKO, A. POPOV  
Azov State Technical University

**Визначення характеристик вимірювального трансформатора напруги типу НТМИ-6-66, необхідних для моделювання феррорезонансних процесів.** У статті наведено основні характеристики вимірювального трансформатора напруги типу НТМИ-6-66, необхідні для моделювання феррорезонансних процесів: крива намагнічування та активні втрати в осерді трансформатора. Наведено результати вимірювання активних втрат у сталі трансформатора. Розглянуто способи апроксимації кривої намагнічування.

**Definition of the Characteristics of Measuring Transformer of Voltage of Type NTMI-6-66 Necessary for the Simulation of Ferroresonance Phenomenon.** The main characteristics of measuring transformer NTMI-6-66 necessary for the simulation of ferroresonance phenomenon are presented. They are the magnetization characteristic of the transformer and active core losses. The results of measuring of the active core losses are presented. Approximation method of the magnetization curve is proposed.