

УДК 621.314.224

**Дмитрий Юрьевич Вихарев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

## Способ определения индуктивности ветви намагничивания в схеме замещения трансформатора тока при насыщении его магнитопровода

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Для анализа переходных процессов в трансформаторе тока широко применяется спрямленная характеристика намагничивания, основным параметром которой является индуктивность ветви намагничивания, соответствующая глубокому насыщению магнитопровода. В настоящее время известны аналитические выражения для ее расчета на основе геометрических размеров магнитопровода. Однако их применение затруднено по причине отсутствия действительных параметров магнитопровода в технической документации. Другим способом определения индуктивности ветви намагничивания является использование амплитудной динамической и средней кривых намагничивания, снятых для вторичной обмотки. Известно, что кривые намагничивания современных трансформаторов тока имеют практически горизонтальное расположение при больших намагничивающих воздействиях, что затрудняет определение индуктивности ветви намагничивания с точностью до десятков мкГн с помощью испытательных комплексов, используемых на объектах электроэнергетики. Таким образом, задача разработки способа определения индуктивности ветви намагничивания в схеме замещения трансформатора тока при насыщении его магнитопровода, отличающегося возможностью измерения в диапазоне мкГн, является актуальной.

**Материалы и методы.** Использованы методы определения амплитудной динамической и средней кривых намагничивания для вторичной обмотки трансформатора тока. Исследование основано на методах математического моделирования нелинейных электрических цепей. Для оценки полученных результатов использованы аналитические выражения для расчета индуктивности тороидальной обмотки.

**Результаты.** Предложен способ определения индуктивности ветви намагничивания, основанный на подаче во вторичную обмотку трансформатора тока высокочастотного синусоидального тока с постоянной составляющей. В соответствии с предложенным способом проведен физический эксперимент по снятию амплитудной динамической и средней кривых намагничивания, а также характеристик для вторичной обмотки трансформатора тока типа ТОЛ-10. В результате обработки экспериментальных данных определены значения индуктивности ветви намагничивания по классическим и предложенному способам. Установлено, что расчетное значение индуктивности ветви намагничивания имеет разброс до 50 мкГн для каждой из кривых намагничивания, в то время как при применении предложенного способа разброс значений составляет около 2 мкГн.

**Выводы.** Предложенный способ определения индуктивности ветви намагничивания трансформатора тока при насыщении его магнитопровода позволяет повысить точность измерений до единиц мкГн.

**Ключевые слова:** трансформатор тока, кривая намагничивания, насыщение магнитопровода, ветвь намагничивания

**Dmitry Yurievich Vikharev**

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

## Method for determining the magnetizing branch inductance in the equivalent circuit of a current transformer under core saturation

### Abstract

**Background.** The linearized magnetization characteristic is widely used for analyzing transient processes in current transformers. Its main parameter is the magnetizing branch inductance corresponding to deep core saturation. Currently, analytical expressions for its calculation based on the geometric dimensions of the magnetic core are known. However, their application is complicated by the absence of actual core parameters in technical documentation. Another method for determining the magnetizing branch inductance involves the use of the peak dynamic and average magnetization curves obtained for the secondary winding. It is known that the magnetization curves of modern current transformers are almost horizontal under high magnetizing excitation, which makes it difficult to determine the magnetizing branch inductance with an accuracy of tens of  $\mu\text{H}$  using test equipment employed at electric power facilities. Therefore, the development of a method for determining the magnetizing branch inductance in the equivalent circuit of a current transformer under core saturation, providing measurement capability in the  $\mu\text{H}$  range, is an urgent task.

**Materials and methods.** Methods for determining the peak dynamic and average magnetization curves of the current transformer secondary winding were used. The proposed method is based on mathematical modeling techniques for

nonlinear electrical circuits. Analytical expressions for calculating the inductance of a toroidal winding were used to evaluate the obtained results.

**Results.** Processing of experimental data obtained during a physical experiment using a TOL-10 current transformer made it possible to determine the magnetizing branch inductance values according to classical and proposed methods. It was found that the calculated inductance values obtained using classical methods have a spread of up to 50  $\mu\text{H}$  for each magnetization curve, whereas the proposed method provides a spread of no more than 2  $\mu\text{H}$ .

**Conclusions.** The proposed method makes it possible to measure the magnetizing branch inductance of a current transformer with an accuracy of several  $\mu\text{H}$ .

**Key words:** current transformer, magnetization curve, magnetic core saturation, magnetizing branch

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.2.049-056

**Состояние вопроса.** Для расчета переходных процессов (ПП) в электромагнитных трансформаторах тока (ТТ) широко применяется классическая схема замещения [1]. Одним из основных ее элементов является ветвь намагничивания, параметры которой определяются характеристикой намагничивания магнитопровода. Для получения наиболее точных результатов расчета ПП в [2] предлагается использовать среднюю кривую намагничивания (СКН). Такое представление магнитной системы ТТ не позволяет получить аналитического выражения для вторичного тока и тока намагничивания, так как расчет выполняется с помощью численных методов. Это обстоятельство существенно затрудняет применение расчетных данных в практических целях. В [3] показано, что для исследования ПП при больших кратностях первичного тока могут быть использованы кусочно-линейные аппроксимации кривой намагничивания: прямоугольная (ПХН) и спрямленная (СХН) характеристики намагничивания. Указанные характеристики представлены на рис. 1.

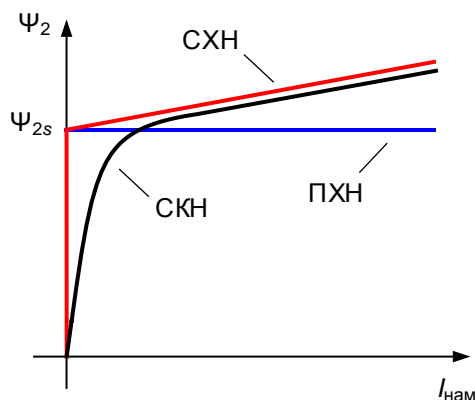


Рис. 1. Характеристики намагничивания магнитопровода ТТ

Участок линейной трансформации у обеих характеристик представляет собой вертикальный отрезок, соединяющий начало координат и точку, соответствующую потокоцеплению насыщения  $\Psi_{2s}$ . При описании магнитной системы с помощью ПХН участок насыщения представляется горизонтальной линией. В СХН потокоцепление вторичной обмотки  $\Psi_2$  на

участке насыщения линейно зависит от величины намагничивающего тока  $I_{\text{нам}}$ . Коэффициент пропорциональности этих двух величин определяется индуктивностью ветви намагничивания  $L_s$ , соответствующей насыщенному состоянию магнитопровода ТТ [4]. Такой вид СХН позволяет получить более точные результаты расчета ПП, сопровождающегося глубоким насыщением магнитопровода, по сравнению с анализом на основе ПХН [4, 5]. В частности, с помощью СХН возможно определить момент времени  $t_b$ , соответствующий переходу магнитопровода в линейный режим после его насыщения, а также момент времени перехода вторичного тока через ноль на участке насыщения [6]. Эти данные могут быть использованы при анализе пусковых и измерительных органов устройств РЗА в случае возникновения коротких замыканий. Также СХН применяется для компенсаций погрешностей ТТ в переходных режимах энергосистем [7]. Значение индуктивности  $L_s$  при больших значениях напряженности магнитного поля (свыше 1000 А/см [6]) может быть использовано для восстановления вторичного тока без использования характеристики намагничивания [8].

Для применения СХН в целях расчета ПП требуется определить значение индуктивности  $L_s$ . В [6] представлены аналитические выражения для расчета этого параметра на основе геометрических размеров магнитопровода и вторичной обмотки. Однако в настоящее время применение этих выражений затруднительно по причине отсутствия геометрических размеров магнитопровода в технической документации на ТТ [9]. В соответствии с результатами исследования [3, 6], индуктивность ветви намагничивания при больших намагничивающих воздействиях может быть определена на основе СКН или амплитудной динамической кривой намагничивания (АДКН). Угол наклона характеристики при значениях напряженности магнитного поля более 10 А/см определяет значение индуктивности  $L_s$ . При отсутствии указанных характеристик также может быть использована вольт-амперная характеристика вторичной обмотки ТТ, снятая в амплитудных величинах. В [1, 10] показано, что индуктивность  $L_s$  в схеме замещения ТТ напряжением 110 кВ имеет порядок нескольких мГн. На основе справочных

данных [4] может быть получена приближенная оценка индуктивности  $L_s$  при больших намагничивающих воздействиях для ТТ типа ТОЛ-10 в 75 мкГн. В таком случае участок насыщения характеристик намагничивания, снятых в ходе физического эксперимента, имеет практически горизонтальное расположение, что не позволяет получить точное значение  $L_s$  с помощью описанных методов. Таким образом, разработка способа определения значения индуктивности ветви намагничивания для насыщенного состояния магнитопровода является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** В [2] предлагается определять индуктивность ветви намагничивания на участке насыщения с помощью СКН или АДКН. Способ получения СКН основан на подаче синусоидального напряжения на вторичную обмотку ТТ при разомкнутой первичной обмотке [1]. В ходе эксперимента производится осциллографирование напряжения на выводах вторичной обмотки  $u_2(t)$  и тока намагничивания  $i_{\text{нам}}(t)$ . На основе полученных временных зависимостей потокосцепление вторичной обмотки  $\Psi_2$  определяется выражением

$$\Psi_2(t) = \Psi_2(0) + \int_0^t (u_2(t) - i_{\text{нам}}(t)R_2) dt, \quad (1)$$

где  $\Psi_2(0)$  – начальное значение потокосцепления;  $R_2$  – омическое сопротивление вторичной обмотки.

Представление параметров магнитной системы однозначной кривой намагничивания допустимо при значении напряженности магнитного поля более 10 А/см. В связи с этим в ходе эксперимента амплитудное значение тока намагничивания  $i_{\text{нам(макс)}}$  должно удовлетворять следующему неравенству с учетом длины средней силовой линии магнитного поля  $l_{\text{ср}}$  и числа витков вторичной обмотки  $w_2$ :

$$\frac{i_{\text{нам(макс)}} w_2}{l_{\text{ср}}} > 10 \frac{\text{А}}{\text{см}}. \quad (2)$$

На координатной плоскости  $(i_{\text{нам}}; \Psi_2)$  формируется кривая на основе мгновенных значений тока намагничивания и потокосцепления вторичной обмотки. В результате может быть получена предельная петля гистерезиса, состоящая из восходящей и нисходящей ветвей. СКН формируется как средняя между двумя ветвями предельной петли (рис. 2). Значение тока намагничивания  $i_{\text{нам(ср)}}$  для этой кривой определяется по выражению

$$i_{\text{нам(ср)}} = \frac{i_{\text{нам(в)}} + i_{\text{нам(н)}}}{2}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{нам(в)}}$ ,  $i_{\text{нам(н)}}$  – ток намагничивания по восходящей и нисходящей кривым предельной петли гистерезиса соответственно.

Геометрический центр динамической петли перемагничивания должен совпадать с началом координат. Ее расположение зависит от начального значения потокосцепления  $\Psi_2(0)$ . Так как в установившемся процессе функция потокосцепления  $\Psi_2(t)$  не содержит постоянных составляющих, ее среднее значение за период изменения тока намагничивания равно нулю. Таким образом, начальное значение потокосцепления  $\Psi_2(0)$  определяется выражением

$$\Psi_2(0) = -\frac{1}{T} \int_0^T \Psi_2(t) dt, \quad (4)$$

где  $T$  – период изменения тока намагничивания.

Значение индуктивности ветви намагничивания  $L_s$  по СКН определяется как производная потокосцепления  $\Psi_{2\text{ср}}$ :

$$L_s = \frac{d\Psi_2}{di_{\text{нам(ср)}}}. \quad (5)$$

Для снятия АДКН при синусоидальном напряжении  $u_2$  измеряют его действующее значение  $U_2$  и амплитудное значение тока намагничивания  $i_{\text{нам(макс)}}$  [5]. Максимальное значение потокосцепления вторичной обмотки  $\Psi_{2(\text{макс})}$  рассчитывается по выражению

$$\Psi_{2(\text{макс})} = \frac{U_2}{\pi f \sqrt{2}}, \quad (6)$$

где  $f$  – частота напряжения  $u_2$ .

При снятии характеристики максимальное значение тока намагничивания  $i_{\text{нам(макс)}}$  также должно удовлетворять условию (2). АДКН представляет собой однозначную зависимость амплитудных значений потокосцепления и тока намагничивания на координатной плоскости  $(i_{\text{нам(макс)}}; \Psi_{2(\text{макс})})$ . Качественный вид характеристики представлен на рис. 2. Параметры ветви намагничивания по АДКН определяются в соответствии с выражением (5).

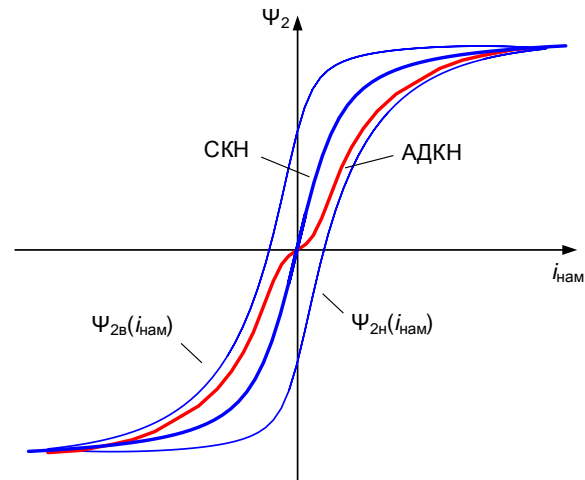


Рис. 2. СКН и АДКН магнитопровода ТТ

Индуктивность  $L_s$  определяет угол наклона характеристики намагничивания на участке

насыщения. Для ТТ 110 кВ с  $L_s = 6$  мГн [10] угол наклона составляет менее  $0,5^\circ$ . На графике этот участок имеет практически горизонтальное расположение. Для получения точных результатов производной по выражению (5) потокосцепление  $\Psi_2$  должно быть определено с точностью до единиц мВб, а напряжение – до десятков и сотен мВ. Зависимость рассчитанного значения  $L_s$  от точности определения величины потокосцепления может быть выражена следующим образом:

$$L_s(\Delta\Psi_2) = \frac{\Psi_{2(2)} - \Psi_{2(1)} + \Delta\Psi_2}{i_{\text{нам}(2)} - i_{\text{нам}(1)}} = \\ = L_{s(\text{ист})} + \frac{\Delta\Psi_2}{i_{\text{нам}(2)} - i_{\text{нам}(1)}}, \quad (7)$$

где  $\Psi_{2(2)}$ ,  $\Psi_{2(1)}$ ,  $i_{\text{нам}(2)}$ ,  $i_{\text{нам}(1)}$  – истинные значения потокосцепления и тока намагничивания в точках 2 и 1 соответственно;  $\Delta\Psi_2$  – максимальное отклонение потокосцепления от истинного значения;  $L_{s(\text{ист})}$  – истинное значение индуктивности ветви намагничивания.

Максимальное отклонение потокосцепления  $\Delta\Psi_2$  линейно зависит от предела допускаемой абсолютной погрешности вольтметра, его значение может быть рассчитано на основе выражения (6):

$$\Delta\Psi_2 = \frac{\Delta U_2}{\pi f \sqrt{2}}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_2$  – предел допускаемой абсолютной погрешности вольтметра.

Для современных вольтметров, например встроенных в широко применяемые испытательные комплексы РЕТОМ, величина  $\Delta U_2$  составляет 0,3 В при измерении в диапазоне до 600 В. В соответствии с выражением (8), для этого измерительного прибора максимальное отклонение потокосцепления  $\Delta\Psi_2$  имеет значение 1,3 мВб. На участке насыщения АДКН и СКН разница токов намагничивания двух точек в выражении (7) может составлять единицы и десятки ампер. В таком случае индуктивность  $L_s$  может быть определена с точностью до сотен и тысяч мкГн. Характеристики, снятые с помощью одной испытательной установки, могут иметь лишь незначительный разброс, обусловленный погрешностью измерительных приборов. Однако даже небольшого несоответствия точек кривых достаточно для получения существенных различий результатов расчета индуктивности  $L_s$ . Таким образом, определение значения  $L_s$  по участку насыщения АДКН или СКН на практике существенно затруднено.

Для определения индуктивности ветви намагничивания на участке насыщения предлагается подавать во вторичную обмотку ТТ синусоидальный ток с постоянной составляющей. В

таком случае ток намагничивания описывается следующим выражением:

$$i_{\text{нам}}(t) = i_{\text{нам}=\} + i_{\text{нам}\sim}(t), \quad (9)$$

где  $i_{\text{нам}=\}$ ,  $i_{\text{нам}\sim}$  – постоянная и переменные составляющие тока намагничивания.

Функция потокосцепления  $\Psi_2$  может быть представлена в виде ряда Тейлора в окрестности величины  $i_{\text{нам}=\}$ :

$$\Psi_2(t) = \Psi_{2=} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d^n \Psi_2}{d i_{\text{нам}=\}^n} \frac{i_{\text{нам}\sim}^n(t)}{n!}, \quad (10)$$

где  $\Psi_{2=}$  – постоянная составляющая потокосцепления  $\Psi_2$ , обусловленная протеканием постоянного тока  $i_{\text{нам}=\}$ .

Рассмотрим дифференциальное уравнение, характеризующее вторичную обмотку ТТ при холостом ходе первичной обмотки [5]:

$$\frac{d\Psi_2}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{d i_{\text{нам}}(t)}{dt} + i_{\text{нам}}(t) R_2 = u_2(t), \quad (11)$$

где  $\Psi_2$  – потокосцепление вторичной обмотки без учета потокосцепления рассеяния;  $L_{\sigma 2}$  – индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Функция напряжения на выводах вторичной обмотки  $u_2(t)$  также может быть представлена в виде суммы двух составляющих:

$$u_2(t) = u_{2=} + u_{2\sim}(t), \quad (12)$$

где  $u_{2=}$ ,  $u_{2\sim}$  – постоянная и переменные составляющие напряжения на выводах вторичной обмотки.

С учетом выражений (9), (10), (12) на основе дифференциального уравнения (11) может быть составлено равенство, описывающее изменение переменных электрических величин:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{d^n \Psi_2}{d i_{\text{нам}=\}^n} \frac{d i_{\text{нам}\sim}^n(t)}{n! dt} + \\ + L_{\sigma 2} \frac{d i_{\text{нам}\sim}(t)}{dt} + i_{\text{нам}\sim}(t) R_2 = u_{2\sim}(t). \quad (13)$$

Известно, в любой точке ферромагнитного материала вектор магнитной индукции  $B$  пропорционален сумме векторов намагниченности  $M$  и напряженности магнитного поля  $H$ :

$$B = \mu_0 (H + M), \quad (14)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная в системе СИ.

При больших напряженностях магнитного поля (более 10 А/см) динамическое перемагничивание материала может не учитываться. В таком случае вектор намагниченности может быть представлен функцией Ланжевена [11]:

$$M(H) = M_s \left( \coth\left(\frac{H}{a}\right) - \frac{a}{H} \right), \quad (15)$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения материала;  $a$  – коэффициент, описывающий вид безгистерезисной кривой.

Вектор магнитной индукции  $B$  при больших намагничивающих воздействиях преимущественно зависит от составляющей  $\mu_0 H$ , так как предел функции Ланжевена при аргументе, стремящемся к бесконечности, равен нулю. Тогда потокоцепление  $\Psi_2$  также можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\Psi_2(i_{\text{нам}}) = L_s i_{\text{нам}} + \varphi(i_{\text{нам}}), \quad (16)$$

где  $\varphi$  – функция, предел которой равен нулю при стремлении аргумента к бесконечности.

Тогда при увеличении постоянной составляющей тока  $i_{\text{нам}} =$  во вторичной обмотке ТТ производными второго и более порядка в выражении (13) можно пренебречь. С учетом этого уравнение (13) может быть записано следующим образом:

$$(L_s + L_{\sigma 2}) \frac{di_{\text{нам}}(t)}{dt} + i_{\text{нам}}(t) R_2 = u_2(t). \quad (17)$$

Для величин, изменяющихся по синусоидальному закону, уравнение (17) может быть записано в комплексных величинах:

$$j\omega(L_s + L_{\sigma 2}) I_{\text{нам}} + I_{\text{нам}} R_2 = U_2, \quad (18)$$

где  $I_{\text{нам}}$ ,  $U_2$  – комплексы действующих значений.

Индуктивность ветви намагничивания  $L_s$  определяется следующим выражением:

$$L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_{\text{нам}}}\right)^2 - R_2^2 - L_{\sigma 2}}. \quad (19)$$

Для оценки возможности представления уравнения (13) в форме (17) предлагается производить измерение индуктивности  $L_s$  для разных значений постоянной и переменной составляющих тока намагничивания. Величина  $i_{\text{нам}}$ , при которой будут наблюдаться одинаковые значения индуктивности  $L_s$  при различных  $I_{\text{нам}}$ , будет считаться достаточной для выполнения перехода от уравнения (13) к (17). Индуктивность рассеяния  $L_{\sigma 2}$  может быть определена с помощью любого известного способа, например [12], или справочных материалов [4].

Частоту переменной составляющей тока следует выбирать такой, чтобы полное сопротивление вторичной цепи, определяемое соотношением  $U_2$  и  $I_{\text{нам}}$ , превышало омическое сопротивление  $R_2$  в несколько раз. Индуктивность  $L_s$  может иметь значение порядка 10 мкГн. В таком случае полное сопротивление вторичной цепи на частоте 50 Гц будет определяться преимущественно омическим сопротивлением, что осложнит получение точных результатов. Рекомендуется выбирать частоту переменной составляющей наибольшей по своему значению в

соответствии с техническими возможностями испытательного устройства.

Приближенное значение индуктивности  $L_s$  при больших намагничивающих воздействиях (свыше 1000 А/см) может быть получено на основе геометрических параметров магнитопровода по выражению [6]

$$L_s \approx \frac{\mu_0 w_2^2 S_c}{l_{\text{cp}}}, \quad (20)$$

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения магнитопровода ТТ.

Точные значения  $L_s$  не могут быть получены с помощью выражения (20), так как геометрические параметры магнитопровода, указанные в справочных данных [4], могут отличаться от действительных.

**Результаты исследования.** Для верификации разработанного способа проведено экспериментальное исследование с применением ТТ типа ТОЛ-10, параметры которого представлены в таблице. Физический эксперимент заключается в снятии АДКН и СКН, проведении измерений в соответствии с предложенным способом для вторичной обмотки, предназначенной для подключения устройств РЗА.

#### Параметры ТТ типа ТОЛ-10

Обозначение	Наименование	Значение
$U_{\text{ном}}$	Номинальное напряжение	10 кВ
$I_{1\text{ном}}$	Номинальный первичный ток	100 А
$I_{2\text{ном}}$	Номинальный вторичный ток	5 А
–	Класс точности вторичной обмотки	10P
$S_{2\text{ном}}$	Номинальная вторичная нагрузка	15 В·А
$K_{\text{ном}}$	Номинальная предельная кратность	10
$R_2$	Омическое сопротивление вторичной обмотки	70 мОм
$X_2$	Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки	0 Ом
$l_{\text{cp}}$	Длина средней силовой линии магнитного поля	0,36 м
$S_c$	Площадь поперечного сечения магнитопровода	$15 \cdot 10^{-4}$ мм <sup>2</sup>
$w_2$	Число витков вторичной обмотки	120 шт.

Для снятия АДКН и СКН к выводам исследуемой вторичной обмотки был подключен источник переменного напряжения РЕТОМ-25. Определение амплитудного значения тока намагничивания и действующего значения напряжения на выводах вторичной обмотки для снятия АДКН осуществлялось с помощью амперметра РА и вольтметра PV1 соответственно. Для осциллографирования электрических величин  $u_2(t)$  и

$i_{\text{нам}}(t)$  для снятия СКН применялся вольтампер-фазометр ПАРМА ВАФ-А(М2) с датчиком тока ДТИ-2. Принципиальная схема экспериментальной установки для снятия характеристик представлена на рис. 3. Напряжение  $u_2(t)$  измеряется непосредственно на выводах вторичной обмотки для исключения влияния параметров силовых кабелей на результаты измерения.

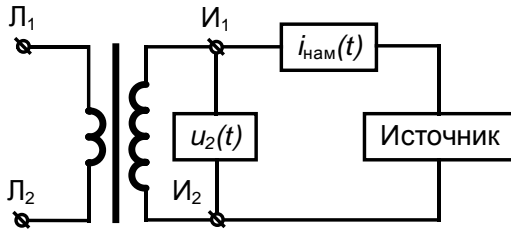


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки для снятия АДКН и СКН:  $u_2(t)$  и  $i_{\text{нам}}(t)$  – места подключения устройств регистрации напряжения на выводах вторичной обмотки и тока намагничивания соответственно

Для представления характеристики намагничивания однозначной кривой амплитудное значение тока намагничивания должно удовлетворять неравенству (2). Для ТОЛ-10 это значение определяется следующим образом:

$$i_{\text{нам(макс)}} > \frac{10I_{\text{ср}}}{w_2} = \frac{10 \cdot 36}{120} = 3 \text{ А.} \quad (21)$$

Как было отмечено, рассчитанное значение индуктивности  $L_s$  может зависеть от точности измерения напряжения на выводах вторичной обмотки. Для определения степени влияния метрологических характеристик вольтметра было снято несколько АДКН и СКН, обозначаемых далее как АДКН №1, 2 и СКН №1, 2. Результаты определения первой группы характеристик представлены на рис. 4. Так как на координатной плоскости соответствующие характеристики практически не различаются, вторая группа характеристик не представлена на рис. 4. Результаты расчета индуктивности  $L_s$  по данным всех кривых намагничивания представлены на рис. 5

Форма экспериментальных кривых АДКН и СКН отличается от классического вида, представленного на рис. 2. Это может быть обусловлено влиянием омического сопротивления вторичной обмотки  $R_2$  на полученные значения токов и напряжений при снятии АДКН. Однако в области насыщения при больших значениях намагнивающего тока ( $i_{\text{нам}} > 3 \text{ А}$ ) кривые практически не различаются, что соответствует известным экспериментальным данным [2]. Рассчитанное по экспериментальным данным значение индуктивности  $L_s$  имеет разброс до 50 мГн на участке насыщения. Для АДКН №1, №2 рассчитанное значение равно 320 и 270 мГн соответственно, для СКН №1, №2 – 180 и 130 мГн соответственно.

Для косвенного измерения индуктивности  $L_s$  в соответствии с предложенным способом к выводам вторичной обмотки подключен источник тока, являющийся частью испытательного комплекса РЕТОМ-71. С помощью специализированного программного обеспечения источник тока был настроен для генерации суммы постоянной и переменной составляющих. Для измерения напряжения на выводах вторичной обмотки  $u_2$  использовался осциллограф Tektronix TBS2074 с функциями фильтрации переменной составляющей сигнала и расчета его действующего значения  $U_2$ . Контроль формы тока намагничивания, а также расчет среднеквадратичного значения его переменной составляющей  $I_{\text{нам}}$  осуществлялись с помощью вольтамперфазометра РЕТОМЕТР-М3 (см. рис. 3).

В ходе эксперимента были определены зависимости действующего значения переменной составляющей напряжения на выводах вторичной обмотки  $U_2$  от значения постоянной составляющей тока намагничивания  $i_{\text{нам}}$  при различных среднеквадратичных значениях переменных составляющих этого тока  $I_{\text{нам}}$ . Экспериментальные кривые представлены на рис. 6. Частота переменной составляющей тока задавалась равной 1 кГц. Диапазон изменения составляющих тока намагничивания ограничивался техническими возможностями испытательной установки и устройств измерения. Результаты расчета значения индуктивности  $L_s$  по выражению (19) на основе экспериментальных данных представлены на рис. 7. Разброс значений  $L_s$  составляет до 2 мГн для постоянной составляющей  $i_{\text{нам}}$  в диапазоне от 45 до 60 А. Для максимального значения постоянной составляющей  $i_{\text{нам}}$  индуктивность  $L_s$  изменяется в диапазоне от 46 до 48 мГн.

Полученные результаты существенно отличаются от расчетных значений, полученных по АДКН и СКН. В ходе обработки экспериментальных данных не обнаружено значительного влияния погрешности измерительных приборов на расчетные значения  $L_s$ , полученные по выражению (19). Это подтверждается тем, что на участке насыщения различных расчетных кривых значения индуктивности  $L_s$  различаются не более чем на несколько мГн. При определении кривых, представленных на рис. 6, установлено, что значение измеряемого напряжения не превышает нескольких вольт. Это позволяет использовать в вольтметре меньший диапазон измеряемой величины, чем при снятии СКН и АДКН, что повышает точность измерений.

Приближенное значение индуктивности  $L_s$  по геометрическим параметрам магнитопровода, в соответствии с выражением (20), составляет

$$L_s \approx \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 120^2 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{0,36} = 75 \text{ мГн.} \quad (22)$$

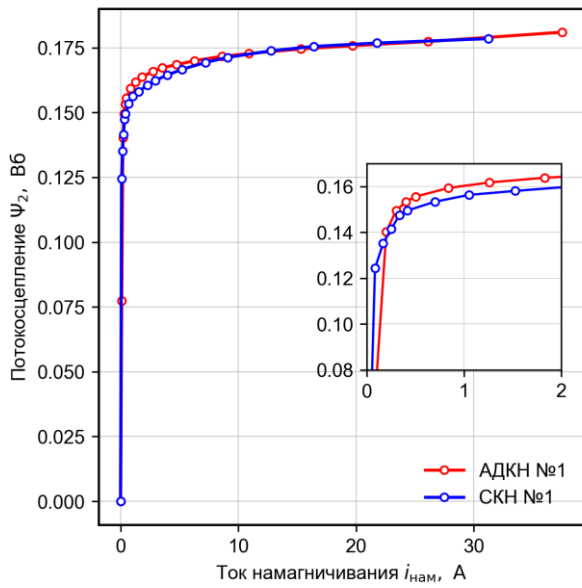


Рис. 4. СКН и АДКН для ТТ типа ТОЛ-10

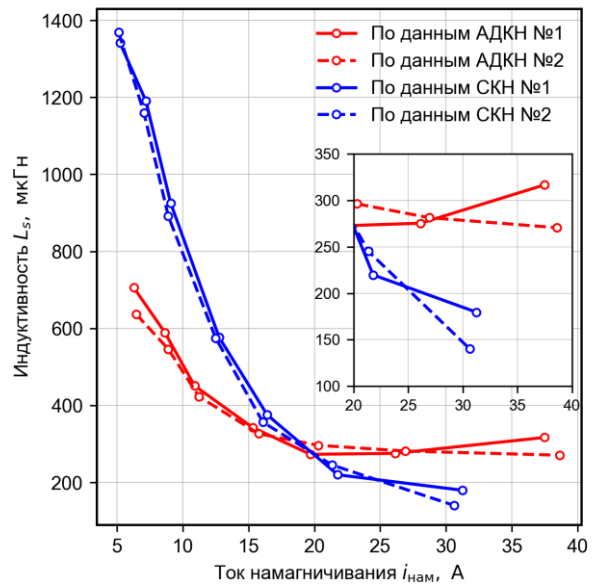


Рис. 5. Зависимость значения индуктивности ветви намагничивания от величины намагничивающего тока (по данным АДКН №1, 2 и СКН №1, 2)

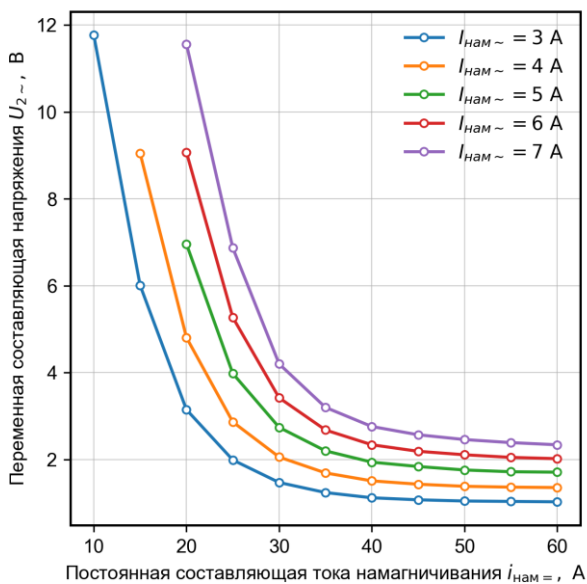


Рис. 6. Экспериментальные зависимости действующего значения переменной составляющей напряжения на выводах вторичной обмотки  $U_{2-}$  от значения постоянной составляющей тока намагничивания  $i_{намаг}$  при различных среднеквадратичных значениях  $I_{намаг}$  для ТТ типа ТОЛ-10

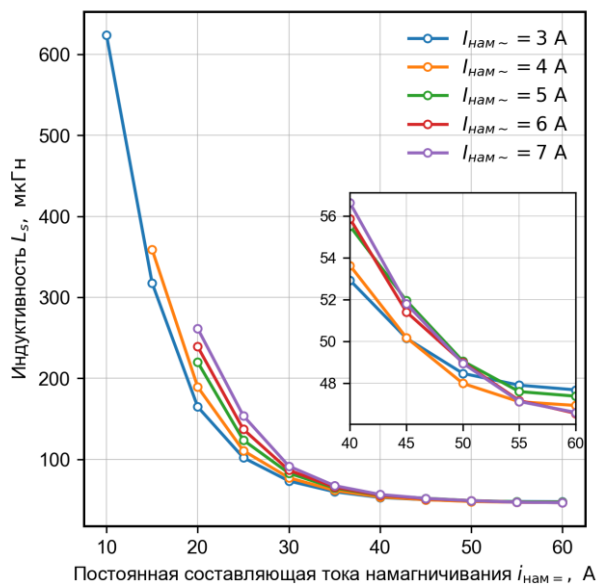


Рис. 7. Зависимость значения индуктивности ветви намагничивания от величины постоянной составляющей намагничивающего тока  $i_{намаг}$  при различных среднеквадратичных значениях  $I_{намаг}$  для ТТ типа ТОЛ-10

Рассчитанное значение отличается от экспериментальных данных. Как было отмечено, это может быть обусловлено несоответствием справочных данных действительным параметрам магнитопровода. Однако результаты, полученные с использованием предложенного способа, близки к приближенной оценке (22), в отличие от значений  $L_s$  по АДКН и СКН.

Также стоит отметить, что значение индуктивности  $L_s$  приближается к оценке (22) при намагничивающем воздействии  $30 \cdot 120 / 36 = 100$  А/см. В [6] указывается, что такое значение  $L_s$  должно

достигаться при напряженности магнитного поля свыше 1000 А/см, что существенно отличается от полученных результатов и может быть обусловлено свойствами материала магнитопровода ТОЛ-10.

**Выводы.** Предложенный способ определения индуктивности ветви намагничивания трансформатора тока при насыщении его магнитопровода позволяет повысить точность измерений до единиц мкГн. Косвенное измерение этого параметра на основе АДКН и СКН

возможно только при применении высокоточных измерительных приборов.

Результаты обработки экспериментальных данных могут применяться для расчета ПП в ТТ типа ТОЛ-10 на основе СХН. Значение индуктивности ветви намагничивания  $L_s$  для этого измерительного преобразователя в дальнейшем будет использовано для восстановления вторичного тока при насыщении магнитопровода в целях повышения устойчивости функционирования устройств релейной защиты.

#### Список литературы

1. Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М.: Энергия, 1965. – 240 с.
2. Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. О выборе расчетной характеристики намагничивания трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. – 1966. – № 9. – С. 87–90.
3. Кузечков С.Л. О методах расчета переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока // Электричество. – 1975. – № 7. – С. 74–77.
4. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 207 с.
5. Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. Моделирование и расчеты переходных режимов в цепях релейной защиты / под ред. А.Д. Дроздова. – М.: Энергия, 1974. – 206 с.
6. Дроздов А.Д., Кузечков С.Л. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах // Электричество. – 1971. – № 1. – С. 27–32.
7. Кузечков С.Л., Дегтярёв А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 3. – С. 29–31.
8. Вихарев Д.Ю., Родин Н.А. Алгоритм восстановления приведенного первичного тока при насыщении электромагнитного трансформатора тока без использования характеристики намагничивания // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2022. – № 6. – С. 36–45. – DOI: 10.31857/S0002331022060061. – EDN AGKYMV.
9. ГОСТ Р 70507.2-2024. Трансформаторы измерительные. Ч. 2. Технические условия на трансформаторы тока: национальный стандарт Российской Федерации / разработан ООО «Эльмаш (УЭТМ)»; внесен ТК 016 «Электроэнергетика». – Введ. 2024-08-01. – М.: Стандартинформ, 2024. – 36 с.
10. Барзилович В.М. Высоковольтные трансформаторы тока. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 248 с.
11. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61, issue 1–2. – P. 48–60.
12. Авторское свидетельство № 311217 А1 СССР, МПК G01R 27/26. Способ измерения индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов тока: № 1400992/18–10; заявл. 02.02.1970; опубл.

09.08.1971 / И.М. Сирота; заявитель – Институт электродинамики АН Украинской ССР. – EDN GNZAAD.

#### References

1. Drozdov, A.D. *Elektricheskie tsepi s ferromagnitnymi serdechnikami v releynoy zashchite* [Electrical circuits with ferromagnetic cores in relay protection]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1965. 240 p.
2. Podgornyy, E.V., Khlebnikov, S.D. O vybere raschetnoy kharakteristiki namagnichivaniya transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh [On selection of magnetization characteristic of current transformers in transient modes]. *Elektrichestvo*, 1966, no. 9, pp. 87–90.
3. Kuzhekov, S.L. O metodakh rascheta perekhodnykh i ustanovivshikhsya protsessov v transformatorakh toka [On methods for calculation of transient and steady-state processes in current transformers]. *Elektrichestvo*, 1975, no. 7, pp. 74–77.
4. Korolev, E.P., Liberzon, E.M. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tsepyakh releynoy zashchity* [Calculation of permissible loads in relay protection current circuits]. Moscow: Energiya, 1980. 207 p.
5. Podgornyy, E.V., Khlebnikov, S.D. *Modelirovanie i raschety perekhodnykh rezhimov v tsepyakh releynoy zashchity* [Modeling and calculation of transient modes in relay protection circuits]. Moscow: Energiya, 1974. 206 p.
6. Drozdov, A.D., Kuzhekov, S.L. Issledovanie formy vtorichnogo toka zashchitnykh transformatorov toka v perekhodnykh i ustanovivshikhsya rezhimakh [Investigation of secondary current waveform of protective current transformers in transient and steady-state modes]. *Elektrichestvo*, 1971, no. 1, pp. 27–32.
7. Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A. O vostanovlenii periodicheskoy sostavlyayushchey pervichnogo toka transformatora toka v perekhodnom rezhime [Restoration of periodic component of primary current of current transformer in transient mode]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2011, no. 3, pp. 29–31.
8. Vikharev, D.Yu., Rodin, N.A. Algoritm vostanovleniya privedennogo pervichnogo toka pri насыщении электромагнитного трансформатора тока без использования характеристики намагничивания [Algorithm for reconstruction of reduced primary current under saturation of electromagnetic current transformer without magnetization characteristic]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2022, no. 6, pp. 36–45. DOI: 10.31857/S0002331022060061.
9. GOST R 70507.2-2024. *Transformatory izmeritel'nye. Ch. 2. Tekhnicheskie usloviya na transformatory toka* [Instrument transformers. Part 2. Technical specifications for current transformers]. Moscow: Standartinform, 2024. 36 p.
10. Barzilovich, V.M. *Vysokovol'tnye transformatory toka* [High-voltage current transformers]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. 248 p.
11. Jiles, D.C., Atherton, D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 61, issue 1–2, pp. 48–60.
12. Sirota, I.M. *Sposob izmereniya induktivnosti rassseyaniya obmotok transformatorov toka* [Method for measuring leakage inductance of current transformer windings]. Author's Certificate USSR, no. 311217, 1971.