

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. В. Белов, О. Р. Шаймухаметова, Ю. П. Ильин, Н. В. Скородумова, Е. Н. Епишков

Надежность электроснабжения предприятий АПК во многом зависит от работоспособности понижающих трансформаторов 6–10/0,4 кВ, ежегодное количество отказов которых достигает 9 %. Основной причиной выхода из строя трансформаторов являются межвитковые замыкания в обмотках. Выявление замыканий осложняется тем, что в начальной стадии повреждения токи в обмотках изменяются незначительно и релейная защита не срабатывает. Дальнейшее развитие повреждения приводит к серьезной аварии и высокой стоимости ремонта трансформатора. Целью работы является выявление межвитковых замыканий на начальной стадии их возникновения. Предложено производить диагностику межвитковых замыканий в обмотках трансформатора, измеряя токи в фазах при отключенной нагрузке, т.е. в режиме холостого хода. Установлено, что межвитковые замыкания приводят к увеличению несимметрии фазных токов в режиме холостого хода трансформатора. Поскольку показателем несимметрии в трехфазной системе с изолированной нейтралью является ток обратной последовательности, то по увеличению тока обратной последовательности можно судить о появлении межвитковых замыканий. Разработан способ выявления межвитковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов. Способ заключается в следующем. Перед началом эксплуатации трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении питания с применением измерительных трансформаторов тока измеряются токи в фазах трансформатора. По модулям фазных токов рассчитывается ток обратной последовательности, для чего разработана программа на ЭВМ. Полученное значение тока обратной последовательности фиксируется в дневнике измерений как исходное. В процессе эксплуатации трансформатор периодически выводится в режим холостого хода, при этом вновь проводятся измерения фазных токов и расчет тока обратной последовательности. Если вновь полученное значение тока обратной последовательности превысит исходное значение, делается вывод о наличии межвитковых замыканий. Высокая чувствительность способа к межвитковым замыканиям обусловлена использованием тока обратной последовательности как индикатора несимметрии в трехфазной сети. Применение способа позволит выявить межвитковые замыкания на начальной стадии их возникновения, что в свою очередь, позволит сократить перерыв в электроснабжении потребителей и минимизировать затраты на ремонт поврежденного трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, межвитковое замыкание, ток обратной последовательности, надежность электроснабжения.

Отличительной особенностью сельских сетей является рассредоточение большого количества понижающих трансформаторов 6-10/0,4 кВ на большой территории. От их состояния зависит надежность электроснабжения потребителей. Число отказов трансформаторов составляет более 9 % ежегодно, причем чаще всего причиной отказов являются межвитковые замыкания в обмотках [1, 2]. Выявление замыканий осложняется тем, что в начальной стадии повреждения токи в обмотках изменяются незначительно и релейная защита не срабатывает. Когда же повреждение разовьется и охватит

всю обмотку, вызвав внутреннее короткое замыкание, то произойдет срабатывание газового реле (в трансформаторах типа ТМ) или мановакуумметра (в трансформаторах типа ТМГ), однако ремонт такого трансформатора обойдется в сумму, близкую к стоимости нового трансформатора [3]. Это свидетельствует об актуальности проблемы выявления межвитковых замыканий на ранней стадии их возникновения.

Исследования по выявлению межвитковых замыканий ведутся с 70-х годов XX века. Работы ведутся в разных странах и в разных направлениях. Обзор разработок представлен в [4, 5, 6].



Следует отметить их недостатки. Часть разработок предполагает проведение исследования при полностью отключенном от питающей сети трансформаторе в стационарных условиях, что предполагает проведение диагностики только при ремонтах [7, 8]. Другая часть, напротив, ставит своей целью диагностику в процессе работы трансформатора под нагрузкой [9, 10, 11]. Известно, что при межвитковых замыканиях ток в первичной обмотке трансформатора несколько увеличивается по сравнению с током при нормальном режиме работы. Однако это увеличение тока в начале повреждения обмоток настолько мало по сравнению с рабочим током, что получить точные данные при работе под нагрузкой не представляется возможным. Напомним, что целью диагностики является обнаружение повреждения на ранней стадии.

В связи с этим нами был выбран компромиссный вариант: проведение диагностики без отключения трансформатора от сети, но с отключением нагрузки. Периодическое отключение нагрузки с целью диагностики в условиях сельских электрических сетей, на наш взгляд, вполне допустимо.

Следует отметить еще одно условие, которое необходимо учитывать при разработке средств диагностики в условиях сельских электрических сетей – это простота диагностической аппаратуры. Эта аппаратура должна обладать низкой

стоимостью, высокой чувствительностью и быть несложной в эксплуатации, чтобы использовать ее мог любой сельский электрик.

Методика выполнения работы

В работе использовались методы расчета электрических цепей, математический анализ, электронное моделирование, программирование. Вычисления производились с использованием программы MathCad.

С учетом оговоренных выше условий было разработано устройство диагностики межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора [12]. Схема устройства представлена на рисунке 1.

В фазы трансформатора T включены трансформаторы тока $TA1$, $TA2$ и $TA3$. В режиме холостого хода на выходе трансформаторов тока появятся сигналы, пропорциональные фазным токам. С помощью диодов $D1$ – $D6$ сигналы выпрямляются. Выпрямитель собран по схеме Ларионова. Это сделано для того, чтобы в обмотках трансформаторов тока не возникло перенапряжений, поскольку при такой схеме диоды беспрепятственно пропускают токи в обоих направлениях. Ток, протекающий по амперметру, пропорционален сумме абсолютных значений фазных токов.

Устройство должно быть частью комплектной трансформаторной подстанции (КТП).

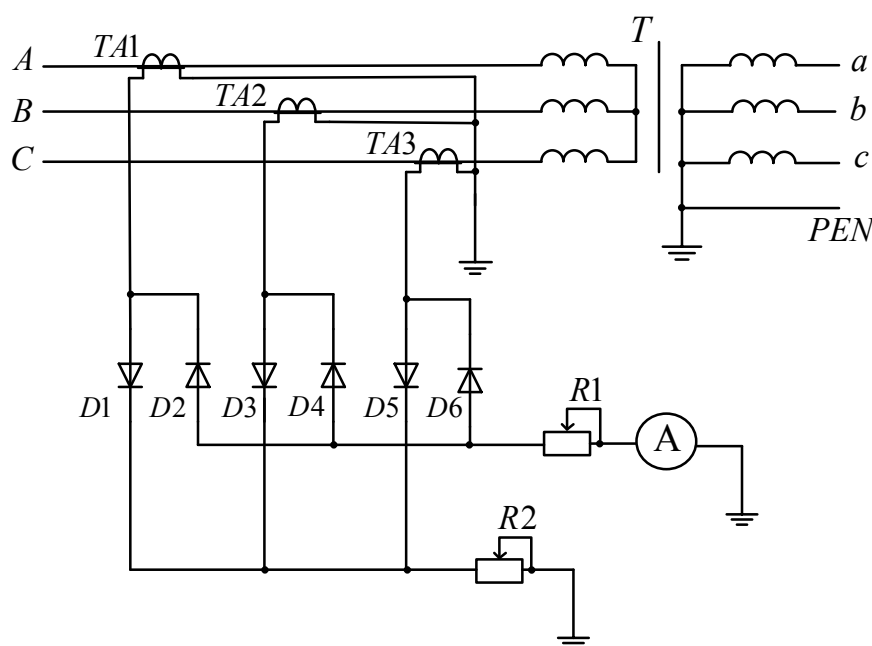


Рис. 1. Схема устройства для диагностики межвитковых замыканий

Обычно двухтрансформаторные КТП оснащены двумя трансформаторами тока. Однотрансформаторные КТП оснащаются трансформаторами тока по заказу потребителей. Для реализации предлагаемого способа необходимо иметь три трансформатора тока, т.е. наличие трех трансформаторов тока должно быть оговорено в заказе на поставку подстанции. В состав устройства также входит диодный блок и амперметр постоянного тока. Эти элементы целесообразно также иметь в составе подстанции. Обслуживающий персонал должен иметь ноутбук или планшет для фиксации результатов измерений.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Перед началом эксплуатации производят первое измерение на неповрежденном трансформаторе в режиме холостого хода. Результат измерения – показания амперметра, пропорциональные сумме абсолютных значений фазных токов, фиксируют (т.е. записывают в дневник измерений в ноутбуке). В процессе эксплуатации периодически трансформатор переводят в режим холостого хода и повторяют измерение. Если значение тока, протекающего по амперметру, превысит ранее зафиксированное, это будет означать, что в обмотках трансформатора имеется повреждение.

Устройство было исследовано на электронной модели и показало удовлетворительные результаты [13].

Дальнейшая работа была посвящена повышению чувствительности устройства. В России обмотки высшего напряжения подключены к сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью. В соответствии с теорией симметричных составляющих в этой системе могут циркулировать токи прямой и обратной последовательности. При этом ток обратной последовательности возникает только при несимметрии токов трехфазной системы. Поскольку повреждения, как правило, не возникают одновременно во всех обмотках, то в результате повреждения возникает несимметрия фазных токов (небольшая несимметрия присутствует и в неповрежденном трансформаторе, но ее можно учесть заранее). Отсюда следует вывод, что токи обратной последовательности являются индикатором повреждений в обмотках. Способ диагностики межвитковых замыканий по наличию токов обратной последовательности известен [14], однако он предполагает наличие дифференциальной защиты трансформатора и дорогостоящего оборудования.

Для того, чтобы рассчитать ток обратной последовательности, необходимо знать не только величину фазных токов, но и углы между их векторами. Существуют приборы, измеряющие углы между векторами токов и напряжений, но их высокая стоимость ограничивает их использование в сельских сетях. Поэтому был разработан метод определения углов между векторами токов по их абсолютным значениям, т.е. по показаниям амперметров.

Поскольку нейтраль трансформатора со стороны высшего напряжения (6–10 кВ) трансформатора изолирована от земли, то при условии преимущественно прямой последовательности фазных токов ($A-B-C$) взаимное расположение векторов фазных токов имеет единственное решение.

Допустим, что векторы фазных токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ находятся на комплексной плоскости в соответствии с рисунком 2. Абсолютные значения векторов этих токов обозначим как A , B , C . Тогда комплексы токов будут иметь вид:

$$\dot{I}_A = A \cdot e^{j\varphi_A}; \quad \dot{I}_B = B \cdot e^{j\varphi_B}; \quad \dot{I}_C = C \cdot e^{j\varphi_C}, \quad (1)$$

где φ_A , φ_B , φ_C – углы отклонения токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ от оси абсцисс.

Зададимся направлением вектора тока фазы A ($\dot{I}_A$). Пусть оно будет положительным и действительным (т.е. $\varphi_A = 0$).

Тогда $\dot{I}_A = A \cdot e^{j\varphi_A} = A \cdot e^{j0^\circ} = A = I_A$.

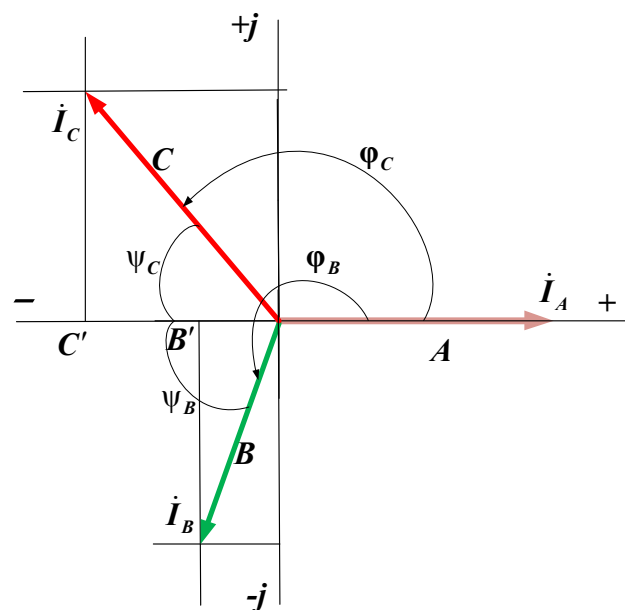


Рис. 2. Расположение фазных токов трехфазной системы



Угол между осью абсцисс и вектором $\dot{I}_B$ в этом случае составит φ_B , а угол между осью абсцисс и вектором $\dot{I}_C$ составит φ_C . Согласно первому закону Кирхгофа, сумма векторов токов трех фаз равна нулю, т.е.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B(\varphi_B) + \dot{I}_C(\varphi_C) = 0, \quad (2)$$

где $\dot{I}_B(\varphi_B)$ и $\dot{I}_C(\varphi_C)$ – вектора токов в фазах B и C .

Из формулы (2) следует также, что сумма векторов двух фазных токов равна вектору тока третьей фазы, взятому с обратным знаком. Иными словами, сумма проекций векторов $\dot{I}_B(\varphi_B)$ и $\dot{I}_C(\varphi_C)$ на ось абсцисс равна вектору $\dot{I}_A$, взятому со знаком «минус».

Обозначив углы между векторами токов $\dot{I}_B(\varphi_B)$ и $\dot{I}_C(\varphi_C)$ и осью абсцисс как ψ_B и ψ_C , найдем проекции векторов на ось абсцисс:

$$B' = B \cdot \cos(\psi_B), \quad C' = C \cdot \cos(\psi_C),$$

и учитывая, что $\psi_B = \varphi_B - 180^\circ$ и $\psi_C = 180^\circ - \varphi_C$, получим:

$$B \cdot \cos(\varphi_B - 180^\circ) + C \cdot \cos(180^\circ - \varphi_B) = A. \quad (3)$$

Решив совместно уравнения (2) и (3), получим значения углов φ_B и φ_C .

Затем векторы токов $\dot{I}_B(\varphi_B)$ и $\dot{I}_C(\varphi_C)$ определим в соответствии с выражениями (1).

Ток обратной $\dot{I}_{A2}$ последовательности для фазы A находим по известной формуле из тео-

рии симметричных составляющих (см., например, [15]):

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C), \quad (4)$$

где a – поворотный вектор, применяемый для разворота других векторов на 120° : $a = e^{j120^\circ}$.

Нахождение тока обратной последовательности можно осуществить, решив задачу с использованием, например, программы MathCad. Но для упрощения расчетов в условиях эксплуатации была разработана программа на ЭВМ, позволяющая получить значение тока обратной последовательности по абсолютным значениям фазных токов [16]. Эта программа может быть легко размещена в любом самом простом ноутбуке. Введя показания трех амперметров, мы немедленно получаем значение тока обратной последовательности.

На основании вышеизложенного был разработан способ выявления межвитковых замыканий в трехфазном потребительском трансформаторе [17]. Схема измерения токов представлена на рисунке 3. В фазные проводники обмоток высшего напряжения включены трансформаторы тока, передающие сигналы на амперметры.

Выявление межвитковых замыканий осуществляется следующим образом. Перед началом эксплуатации, т.е. на заведомо неповрежденном трансформаторе, измеряются токи в фазах со стороны высшего напряжения в режиме

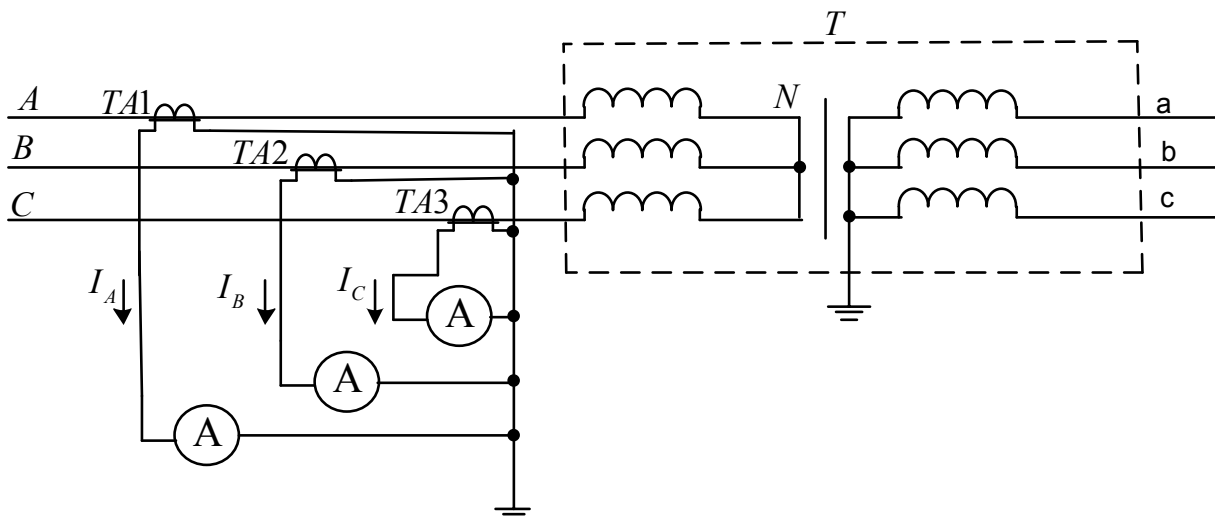


Рис. 3. Схема измерения фазных токов трехфазного трансформатора

холостого хода при номинальном напряжении питания. Значения токов вводятся в программу ЭВМ, размещенную в ноутбуке, в результате получаем значение тока обратной последовательности. Это значение вводим в память ноутбука в дневник измерений в качестве исходных данных.

Здесь следует отметить, что абсолютные значения (модули) токов обратной последовательности, в соответствии с теорией симметричных составляющих, одинаковы для всех фаз и отличаются только направлением (находятся под углом 120 градусов друг от друга). Поэтому не имеет значения, для какой из фаз будет рассчитан ток обратной последовательности – абсолютное значение тока обратной последовательности, рассчитанное для всех фаз, одинаково.

Значение тока обратной последовательности в режиме холостого хода сохраняется примерно постоянным до тех пор, пока трансформатор исправен. Более того, для трансформаторов одной мощности и одной конструкции (одного завода-изготовителя) эти значения практически одинаковы.

При возникновении межвиткового замыкания фазные токи, измеренные таким же образом в режиме холостого хода, изменяются. Сумма фазных токов, измеренных в режиме холостого хода, увеличивается, хотя какой-то отдельный фазный ток может даже уменьшиться. При этом изменяются и углы между векторами фазных токов.

Способ предполагает периодическое повторение измерений в ходе эксплуатации трансформатора. Измерение проводится в режиме холостого хода. Всякий раз производится расчет тока обратной последовательности. О возникновении межвиткового замыкания можно судить по появлению разности между определенным в ходе эксплуатации значением тока обратной последовательности и его исходным значением.

Устройство, как и в предыдущем случае, должно содержать три трансформатора тока, встроенных в КТП, и три амперметра. Кроме того, обслуживающий персонал должен иметь ноутбук, в котором кроме дневника измерений должна содержаться программа расчета тока обратной последовательности [16].

Результаты работы

Результатом работы является способ выявления межвитковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов, отличающийся

повышенной чувствительностью к появлению межвитковых замыканий.

Сравним предлагаемый способ со способом [7], описанным в начале статьи и взятым в качестве прототипа, по чувствительности к межвитковым замыканиям.

Как известно, в основе прототипа лежит сравнение суммы абсолютных значений фазных токов (т.е. показаний амперметров) до и после межвиткового замыкания, измеренных в режиме холостого хода трансформатора.

Допустим, что при первом измерении (на исправном трансформаторе) получены следующие значения фазных токов: $A = 125$; $B = 99$ и $C = 126$ (единицы измерения условно опущены).

Сумма абсолютных значений фазных токов при первом измерении, т.е. на исправном трансформаторе, составляет:

$$\sum I = |I_A| + |I_B| + |I_C| = 125 + 99 + 126 = 350.$$

При очередном измерении токов холостого хода в процессе эксплуатации (за это время появилось замыкание витков в обмотке фазы C) модули сигналов, снятых с трансформаторов тока, оказались равными: $A = 160$; $B = 79$ и $C = 174$ (данные эксперимента). При этом сумма абсолютных значений токов составила:

$$\sum I'' = |I_A''| + |I_B''| + |I_C''| = 160 + 79 + 174 = 413.$$

Оценим чувствительность способа в данном случае, приняв коэффициент чувствительности как отношение разности полученного и исходного модулей токов к исходному, выраженное в процентах. Коэффициент составляет:

$$K = \frac{\sum I'' - \sum I}{\sum I} \cdot 100 = \frac{413 - 350}{350} \cdot 100 = 18 \, \%.$$

Ток увеличился на 18%. Теперь рассмотрим предлагаемый способ, используя те же показания амперметров.

Итак, при первом измерении получены следующие значения фазных токов: $A = 125$; $B = 99$ и $C = 126$. Расчет тока обратной последовательности для фазы A в комплексном алгебраическом выражении дал следующий результат:

$$\dot{I}_{A2} = 9,769 - j14,03,$$



или в абсолютном значении

$$|\dot{I}_{A2}| = |9,769 - j14,03| = 17,096.$$

В процессе эксплуатации при очередном измерении токи холостого хода (при межвитковом замыкании в обмотке фазы C) составили $A = 160$; $B = 79$ и $C = 174$.

Расчет тока обратной последовательности для фазы A (при межвитковом замыкании в фазе C) в комплексном алгебраическом выражении дал следующий результат:

$$\dot{I}_{A2}''' = 34,477 - j43,364,$$

или в абсолютном значении

$$|\dot{I}_{A2}'''| = |34,477 - j43,364| = 55,4.$$

Появившаяся разность токов обратной последовательности свидетельствует о межвитковом замыкании в обмотках:

$$\Delta \dot{b}''' = |\dot{I}_{A2}''' - \dot{I}_{A2}| = 55,4 - 17,096 = 38,304.$$

Коэффициент чувствительности способа определим как отношение разности абсолютного значения тока обратной последовательности, рассчитанному в процессе эксплуатации, и исходного абсолютного значения тока обратной последовательности, выраженное в процентах:

$$K''' = \frac{|\dot{I}_{A2}'''| - |\dot{I}_{A2}|}{|\dot{I}_{A2}|} \cdot 100 = \frac{55,4 - 17,096}{17,096} \cdot 100 = 224 \%,$$

что более чем в 12 раз превышает коэффициент чувствительности выявления межвитковых замыканий по прототипу (коэффициент K).

Приведенный расчет доказывает, что предлагаемый способ по сравнению с прототипом обеспечивает большую чувствительность к межвитковым замыканиям.

Выводы

Разработан способ выявления межвитковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов, при котором чувствительность к появлению замыканий повышена благодаря использованию значений токов обратной последовательности как наиболее чувствительных индикаторов межвитковых замыканий.

Способ хорошо сочетается с цифровыми технологиями диагностики, поскольку при его реализации не используются никакие механические устройства, кроме трансформаторов тока.

Выявление межвитковых замыканий на начальной стадии их развития позволит сократить перерыв в электроснабжении потребителей и минимизировать затраты на ремонт поврежденного трансформатора.

Список литературы

1. Рыбаков, Л. М. Диагностика и надежность в системах электроснабжения : монография / Л. М. Рыбаков, Н. Л. Макарова, В. П. Калывин. – Йошкар-Ола, 2016. – 319 с.
2. Иванова, З. Г. Анализ причин отказов трансформаторов 10/0,4 кВ за 10 лет / З. Г. Иванова, Р. А. Ахметшин, Н. Л. Макарова // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Кубик, 2012. – С. 95–99.
3. Засыпкин, А. С. Релейная защита трансформаторов / А. С. Засыпкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
4. Градов, А. А. Проблема выявления витковых замыканий силового трансформатора и ее решение / А. А. Градов, Н. Л. Макарова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 9. – С. 42–47.
5. Файфер, Л. А. Существующие методы мониторинга силовых трансформаторов / Л. А. Файфер // Молодой ученый. – 2016. – № 12 (116). – С. 412–415.
6. Иванова, З. Г. Разработка устройств для выявления витковых замыканий в обмотках сухих силовых трансформаторов / З. Г. Иванова, Н. Л. Макарова // Вестник МГАУ. – 2013. – № 1 (57). – С. 30–31.
7. Патент РФ № 2645811. Способ выявления витковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов / М. Л. Сапунков [и др.]. – 2018. – Бюл. № 7.
8. Мустафин, Р. Г. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе / Р. Г. Мустафин, Р. Ф. Ярош // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 78–89.
9. Иванова, З. Г. Стратегия обслуживания на основе результатов диагностирования состояния активной части силовых трансформаторов с учетом смещения резонансных частот

в зависимости от увлажнения и наличия витковых замыканий в обмотках / З. Г. Иванова, Л. М. Рыбаков // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 103 (09). – С. 4–21.

10. Галушко, В. Н. Повышение надежности трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых коротких замыканиях / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко, С. И. Зайцев // Вестник Белорусского гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 85–89.

11. Шерьязов, С. К. Токи небаланса при межвитковом замыкании в обмотках трансформаторов 6–10/0,4 кВ / С. К. Шерьязов, А. В. Пятков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 19 (3–4). – С. 145–150.

12. Пат. РФ на полезную модель № 205505. Устройство для диагностики межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора / А. В. Белов [и др.]. – 2021. – Бюл. № 20.

13. Development of a system for ensuring sustainable power supply to agricultural consumers based on an electronic model / A. V. Belov

[et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 723. – P. 052011. – DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052011.

14. Иванченко, Д. И. Идентификация межвитковых замыканий трансформатора на основе анализа амплитудно-фазовых соотношений токов обратной последовательности / Д. И. Иванченко, О. Б. Шонин // Записки Горного института. – 2012. – Т. 196. – С. 240–243.

15. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов ; под ред. И. П. Крюčkова. – Москва : Изд-во МЭИ, 2022. – 416 с.

16. Свид-во о рег. программы для ЭВМ RU 2022619022, Расчет токов обратной последовательности по модулям фазных токов в трехфазном потребителском трансформаторе : опубл. 18.05.2022 / А. В. Белов [и др.].

17. Патент РФ № 2794204. Способ выявления межвитковых замыканий в обмотках трехфазных потребителских трансформаторов / А. В. Белов [и др.]. – 2023. – Бюл. № 11.

Белов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: belovav00@mail.ru.

Шаймухаметова Ольга Рафхатовна, магистрант 2-го курса заочного отделения, ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет; инженер, филиал «Челябэнерго» МРСК Урала.

E-mail: shaymuhametova_olga@mail.ru.

Ильин Юрий Петрович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: U-ilyin@mail.ru.

Скородумова Наталья Викторовна, старший преподаватель, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: rudnyh-natalya@mail.ru.

Епишков Егор Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: een_1978@mail.ru.

* * *