

УДК 21.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-80-86

Экспериментальные исследования алгоритма мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения на макете участка цепи

В.М. Геворкян, К.В. Краюшкин

Представлены результаты исследования физического макета участка цепи генераторного напряжения электрических станций, построенного на базе двух высоковольтных трансформаторов напряжения. На основе физического моделирования изучен возможный алгоритм мониторинга состояния изоляции трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электрических станций, предназначенный для предсказания нарушений в его функционировании. На макете исследованы нарушения, связанные с коротким замыканием в высоковольтной обмотке однофазных измерительных трансформаторов напряжения с заземленной нейтралью типа ЗНОЛ, возникающим в результате временной деградации их литой изоляции. Короткое замыкание моделируется переключением отводов первичной обмотки. При этом рассмотрено влияние короткого замыкания витков первичной высоковольтной обмотки одного трансформатора на токи в первичных и напряжения во вторичных обмотках обоих устройств.

Результаты экспериментального исследования электрических характеристик физического макета участка сети генераторного напряжения подтвердили рост тока в первичной обмотке трансформатора при постоянстве выходного напряжения на вторичной обмотке. Это необходимо для подтверждения алгоритма обнаружения развития короткого замыкания в высоковольтной обмотке. Экспериментально показано, что эффект постоянства выходного напряжения трансформатора напряжения при замыкании части витков первичной обмотки в режиме холостого хода на вторичной обмотке соблюдается и при переходе трансформатора напряжения в нелинейный режим намагничивания магнитопровода, что ожидалось вследствие численного моделирования.

Даны результаты анализа влияния нагрузки вторичной обмотки на режим трансформатора. Расчетная оценка влияния сопротивления нагрузки на выходное напряжение измерительного трансформатора напряжения с учетом короткого замыкания витков в его первичной обмотке показала наличие связи между измеряемой характеристикой фазы сети (фазным напряжением) и состоянием изоляции его высоковольтной обмотки. Данная связь может пополнить номенклатуру случаев неправильной работы устройств релейной защиты.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, электростанция, мониторинг, короткое замыкание, аварийная ситуация.

Для цитирования: Геворкян В.М., Краюшкин К.В. Экспериментальные исследования алгоритма мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения на макете участка цепи // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 80—86. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-80-86.

Experimental Investigation of an Algorithm for Monitoring the State of Instrument Voltage Transformer Insulation on a Network Segment Physical Model

V.M. Gevorkyan, K.V. Krayushkin

The article presents the results from investigating the power plant generator voltage circuit segment physical model made using two high-voltage transformers. A possible algorithm for monitoring the state of voltage transformer insulation in the power plant generator voltage circuit, which is intended for predicting insulation malfunctions, is studied on the basis of a physical modeling approach. Malfunctions resulting from a short circuit fault in the high-voltage winding of type ZNOL single-phase instrument voltage transformers with the grounded neutral caused by gradual degradation of their cast insulation are investigated on the physical model. The short circuit fault is modeled by short-circuiting the transformer's primary winding taps. Also, the effect the short-circuiting of turns in the primary high-voltage winding of one transformer has on the currents in the primary windings and voltages in the secondary windings of both devices is considered.

The results from experimental investigation into the electrical characteristics of the generator voltage network segment's physical model have confirmed that there is a growth of current in the transformer primary winding at a constant output voltage at the secondary winding. This is necessary for validating the algorithm of detecting a short circuit fault development process in the high-voltage winding. It has been experimentally shown that

the effect of the instrument transformer output voltage remaining constant in short-circuiting part of primary winding turns with the secondary winding operating in the no-load mode still takes place also when the voltage transformer shifts to operate under nonlinear magnetic core magnetization conditions, as was expected from the numerical simulation results.

The results from analyzing the effect the secondary winding load has on the transformer operation mode are presented. A numerical assessment of the effect the load resistance has on the instrument voltage transformer output voltage with taking into account the presence of short-circuited turns in its primary winding has shown that there is a correlation between the measured characteristic of the network phase (phase voltage) and the state of the transformer high voltage winding insulation. This correlation can supplement the list of cases with incorrect operation of relay protection devices.

Key words: voltage transformer, power plant, monitoring, short circuit fault, emergency.

For citation: Gevorkyan V.M., Krayushkin K.V. Experimental Investigation of an Algorithm for Monitoring the State of Instrument Voltage Transformer Insulation on a Network Segment Physical Model. Bulletin of MPEI. 2019;2:80—86. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-80-86.

Введение

Изучен алгоритм мониторинга состояния изоляции трансформаторов напряжения (ТН) в цепи генераторного напряжения электрических станций (ЭС), предназначенный для предсказания нарушений в его функционировании [1]. Нарушения, как правило, связаны с коротким замыканием (КЗ) в высоковольтной обмотке однофазных измерительных ТН с заземленной нейтралью типа ЗНОЛ, возникающим в результате временной деградации их литой изоляции [2, 3].

Проведенные математический анализ [1] предложенного метода и моделирование в среде Cadence OrCAD 16.6 (Capture и PSpice) [4] показали целесообразность выбора тока в первичной высоковольтной обмотке ТН в качестве индикатора состояния изоляции ввиду высокой чувствительности тока в первичной обмотке ТН к замыканию витков обмотки из-за дефекта изоляции [5]. Так, при КЗ всего 2% от числа витков в первичной обмотке отклонения тока в ней составляют около 7% от исходного значения. С ростом числа КЗ витков ток растет.

В настоящей работе на физическом макете, образованном одинаковыми понижающими ТН, экспериментально показано действие алгоритма диагностирования технического состояния измерительных ТН в сети генераторного напряжения электростанций. Применены высоковольтные ТН на напряжение 3 кВ с коэффициентом трансформации 13,6. Это отличает ТН макета от параметров реальных ЗНОЛ сети генераторного напряжения. Однако указанное различие не меняет сути явления появления выходного напряжения ТН при росте тока первичной обмотки в результате КЗ в ней, присущего, как показано в [1], ТН любого вида. Моделирование КЗ выполнялось замыканием части витков первичной обмотки за счет специально сделанных в ней отводов. Результаты эксперимента подтвердили действие алгоритма, причем, эффект постоянства выходного напряжения ТН при КЗ части витков первичной обмотки соблюдался и при переходе ТН в нелинейный режим намагничивания магнитопровода, что ожидалось вследствие численного моделирования [1].

Проведенные оценки влияния КЗ в первичной обмотке на ток в нагрузке ТН показывают опасность ложных срабатываний систем индикации при нарушениях

изоляции высоковольтной обмотки измерительных ТН сети генераторного напряжения.

Моделирование на физическом макете

Описание экспериментальной установки

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. В качестве макетов измерительных трансформаторов применены одинаковые высоковольтные трансформаторы на напряжение 3 кВ, подключенные высоковольтной обмоткой через ЛАТР к сети напряжения 220 В, т. е. в режиме понижающего трансформатора, имитирующем работу измерительных ТН в цепи генераторного напряжения ЭС.

Эквивалентная схема макета участка электрической цепи (рис. 1) из двух трансформаторов напряжения дана на рис. 2. Отводы $B - G$ первичной обмотки основного ТН1 и провод 2 использованы для моделирования КЗ витков.

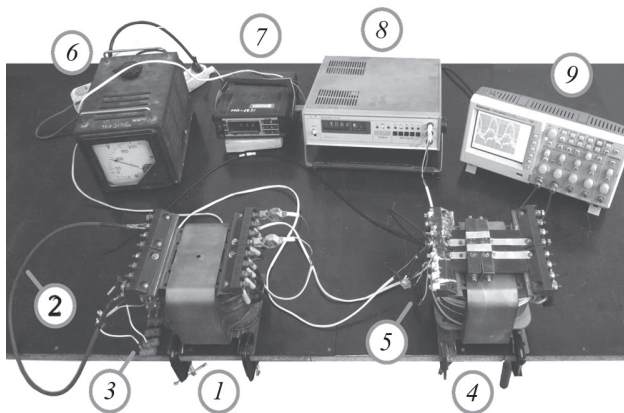


Рис. 1. Внешний вид физического макета из двух ТН:

1 — основной трансформатор; 2 — провод для моделирования короткого замыкания; 3 — датчик тока ТН1 (резистор с сопротивлением 1 Ом, падение напряжения на котором численно равно току); 4 — дополнительный трансформатор; 5 — датчик тока ТН4 (аналогичен датчику 3); 6 — ЛАТР, моделирующий фазу системы; 7 — цифровой вольтметр В7-35; 8 — цифровой вольтметр В7-40 (используется для контроля выходного напряжения трансформаторов и предназначен для экспериментального подтверждения независимости выходных напряжений ТН от КЗ в первичной обмотке одного из них) [6]; 9 — осциллограф Tektronix TDS 2004B (служит для анализа токов в первичных обмотках обоих ТН) [7]

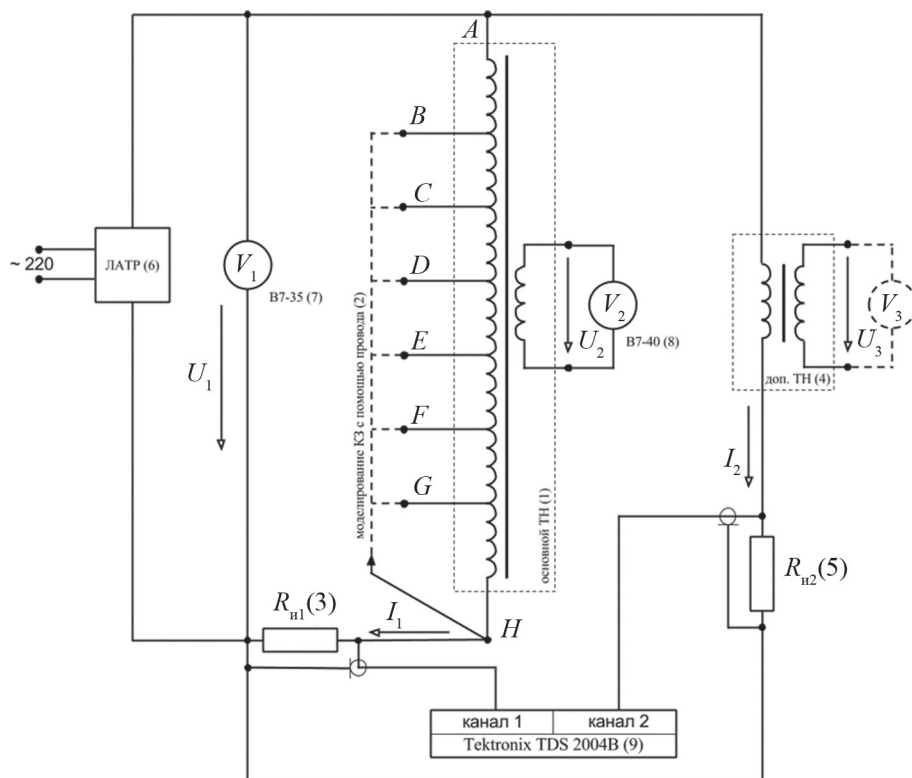


Рис. 2. Эквивалентная схема макета из двух ТН

Малые величины измеряемых параметров определили необходимость организации сигнальных измерительных цепей с применением коаксиальных кабелей, подключением их центральных жил и экранов непосредственно к точкам измерения (съёма сигнала), а также выполнения экспериментального подбора положения проводников массы цепи в соответствии с общими рекомендациями для минимизации помех [8].

Проведение и результаты эксперимента

Точное число витков между отводами первичной обмотки трансформаторов неизвестно, поэтому для оценки влияния КЗ на ток в первичной обмотке было измерено отношение количества замкнутых витков к общему количеству витков (процент витков, замкнутых накоротко), пропорциональное сопротивлению на постоянном токе (табл. 1).

Эксперимент состоял из двух однотипных серий опытов с макетом. Замыкание моделировали с помощью провода 2 (провод последовательно подключали к отводам первичной обмотки ТН1, закорачивая таким образом все большее количество витков).

В первой серии опытов исследовали расчетное положение о независимости напряжения на вторичных обмотках обоих ТН системы от КЗ в первичной обмотке основного ТН (напряжения измеряли в стационарном режиме), выдвинутое в [1]. Результаты опытов полностью подтвердили теоретическое положение — напряжение стабильно с точностью до погрешности, обеспеченной возможностями вольтметра δ , менее мВ (B7-40, [6]).

Таблица 1

Результаты анализа количества витков между отводами первичной обмотки основного ТН 1

| Участок обмотки | Сопротивление участка, Ом | Процент витков на участке, % |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|
| АН | 243 | 100 |
| ГН | 7 | 2,9 |
| FN | 13 | 5,3 |
| ЕН | 19 | 7,8 |
| ДН | 25 | 10,3 |
| СН | 31 | 12,3 |
| ВН | 37 | 15,2 |

Во второй серии опытов изучали влияние КЗ на токи в первичных обмотках обоих ТН. Подтверждены ожидаемый рост тока в первичной обмотке ТН 1, а также независимость режима параллельно включенного ТН4 от режима в первичной обмотке ТН1 в случае сети «бесконечной мощности».

Осциллограф поставлен в режимы индикации мгновенных значений токов в первом и втором каналах, разницы между токами (результат выведен на экран прибора в виде дополнительной осциллограммы), а также индикации среднеквадратичных (действующих) значений токов обоих каналов [7].

Начальный режим системы (вид временных кривых на рис. 3):

- $U_1 = 100$ В (значение поддерживали на протяжении всего эксперимента и контролировали с помощью вольтметра 7);
- $I_1 = 0,8$ мА (действующее значение тока в первичной обмотке ТН1);
- $I_2 = 3$ мА (действующее значение тока в первичной обмотке ТН4);
- $math = 2,2$ мА (разность действующих значений токов в первичных обмотках ТН1 и ТН4).

Результаты измерений действующих значений токов приведены в табл. 2.

Особый интерес представляет динамика изменения формы сигналов исследуемых токов, которую можно оценить, сравнив осциллограммы рис. 3, а — з. Из осциллограмм рис. 3 видно, что исходный режим обоих ТН нелинейный с резко выраженной третьей гармоникой тока (заметим, что это частная особенность, присущая конкретному типу ТН). С увеличением числа КЗ витков в первичной обмотке ТН1 режим в ней плавно переходит в линейный, что демонстрирует вид кривой мгновенных значений рис. 3, з (максимальное число КЗ витков для данного макета).

Процесс изменения режима можно объяснить изменением соотношения активной и реактивной составляющих сопротивления первичной обмотки ТН1, которое наблюдается в результате роста потокоцепления (индукции) магнитопровода (обратно пропорционального числу витков при постоянном напряжении на зажимах обмотки). При этом индуктивность обмотки уменьшается пропорционально относительной магнитной проницаемости магнитопровода. Полное сопротивление приближается к активному.

Таблица 2

Зависимость тока в первичной обмотке ТН 1 от количества короткозамкнутых витков в ней

| $\Delta W, \%$ | $I_1, \text{мА}$ | $\Delta I_1, \text{мА}$ | $math, \text{мА}$ |
|----------------|------------------|-------------------------|-------------------|
| 2,9 | 6,02 | 5,22 | 3,02 |
| 5,3 | 11,3 | 10,5 | 8,3 |
| 7,8 | 21,4 | 20,6 | 18,4 |
| 10,3 | 27,0 | 26,2 | 24,0 |
| 12,3 | 33,2 | 32,4 | 30,2 |
| 15,2 | 39,9 | 39,1 | 36,9 |

В конечном итоге цель эксперимента заключалась в проверке чувствительности тока в первичной обмотке ТН к короткому замыканию витков в ней. При данной конфигурации макета при КЗ всего 3% витков ток возрастает примерно в 7,5 раз. При нелинейном режиме (в режиме насыщения магнитопровода) эффект постоянства выходного напряжения сохраняется, а ток первичной обмотки меняется (растет). Все это однозначно подтверждает удобство использования тока первичной обмотки для общей оценки возможности дальнейшей эксплуатации ТН. При этом система мониторинга, построенная на базе тока первичной обмотки, будет крайне устойчива к воздействию разного рода погрешностей.

Анализ влияния сопротивления нагрузки на режим трансформаторов напряжения

Рассмотренный режим постоянства выходного напряжения ТН соответствовал случаю режима холостого хода на выходной обмотке. Это близко рабочему

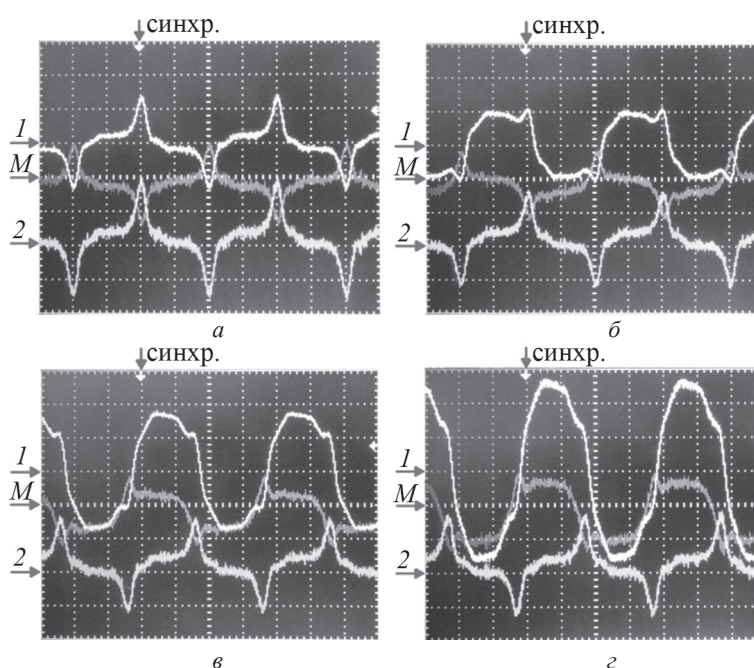


Рис. 3. Ток в отсутствии КЗ (а) и КЗ участков F – H (б, $\Delta W = 5,3\%$), D – H (в, $\Delta W = 10,3\%$), B – H (з, $\Delta W = 15,2\%$)

режиму измерительного трансформатора. Однако интересно оценить зависимость выходного напряжения такого ТН от сопротивления нагрузки (входного сопротивления измерительного устройства, подключенного к выходной обмотке).

Изучим зависимость напряжения на вторичной обмотке ТН при подключении к ней сопротивления нагрузки Z_n . Расчет проведем с применением метода эквивалентного генератора. Для этого воспользуемся результатами вычислений напряжения холостого хода U_2 измерительного ТН (работающего в режиме холостого хода) при КЗ в первичной обмотке L_1 в приближении $K_{св} = 1$, приведенными в [1].

Ввиду независимости U_2 от числа КЗ витков, задача сводится к определению зависимости сопротивления эквивалентного генератора от числа КЗ витков. Расчет проведем, ориентируясь на схему рис. 4.

Применяя развязку индуктивных связей, относительно зажимов 1 — 2, получим эквивалентное внутреннее сопротивление эквивалентного генератора:

$$\begin{aligned} Z_{\text{эКВ}} &= j\omega L_3 - j\omega M_{13} - j\omega M_{23} + j\omega M_{13} + \\ &+ j\omega M_{23} + j\omega M_{12} + R_3 = R_3 + j\omega L_3 + j\omega M_{12} = \\ &= R_3 + j\omega L_3 + j\omega \sqrt{L_1 L_2}. \end{aligned}$$

Пусть количество короткозамкнутых витков первичной обмотки меняется в зависимости от общего числа витков первичной обмотки пропорционально коэффициенту $k = [0, 1]$, тогда $L_1 = kL_I$, $L_2 = (1 - k)L_I$ и $\sqrt{L_1 L_2} = L_I \sqrt{k(1 - k)}$. В результате получим соотношение для $Z_{\text{эКВ}}$:

$$Z_{\text{эКВ}} = R_{II} + j\omega L_{II} + j\omega L_I \sqrt{k(1 - k)}.$$

Получим ток во вторичной обмотке с учетом сопротивления её нагрузки $I_n = U_{\text{хх}} / (Z_{\text{эКВ}} + Z_n)$, где $U_{\text{хх}} = \text{const}$. Таким образом, ток (а, следовательно, и напряжение) на нагрузке зависят от числа короткозамкнутых витков в первичной обмотке ТН. Степень влияния определяется соотношением между внутренним сопротивлением эквивалентного генератора и сопротивлением нагрузки. При этом внутреннее сопротивление эквивалентного генератора примерно равно полному сопротивлению вторичной обмотки ТН, поэтому для минимизации влияния КЗ витков первичной обмотки на выходное напряжение ТН необходимо обеспечить $Z_n \approx 10Z_{\text{эКВ}}$. Учитывая реальные значения $\omega L_I \approx \approx 300\,000$ Ом ЗНОЛ [1] и возможные значения $Z_{\text{эКВ}} \approx \approx 150\,000$ Ом (при $k \approx 0,5$), обеспечить соотношение непросто.

Этот вывод важен при решении задачи применения ТН для защиты элементов ЭС, поскольку индикатор состояния фазы сети — напряжение на выходных зажимах ТН зависит от состояния изоляции высоковольтной обмотки (КЗ в первичной обмотке). Это проявляется в ложных срабатываниях систем защиты.

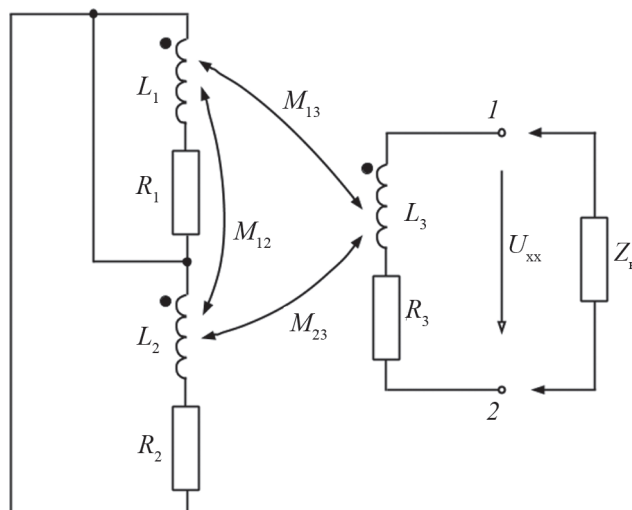


Рис. 4. Схема для расчета внутреннего сопротивления эквивалентного генератора относительно зажимов вторичной обмотки:

L_1, R_1, L_2, R_2 — индуктивность и активное сопротивление короткозамкнутой части витков первичной обмотки и аналогичные параметры рабочей части витков; L_3, R_3 — параметры вторичной обмотки; $M_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$, $M_{13} = \sqrt{L_1 L_3}$, $M_{23} = \sqrt{L_2 L_3}$ — потокоцепления соответствующих индуктивных элементов схемы; $L_I = L_1 + L_2$ — общая индуктивность первичной обмотки; $L_{II} = L_3$, $R_{II} = R_3$ — индуктивность и активное сопротивление вторичной обмотки; 1, 2 — зажимы

Заключение

Выдвинут и теоретически обоснован ряд положений по поводу поведения основных параметров измерительного ТН типа ЗНОЛ в процессе разрушения его изоляции (КЗ витков первичной обмотки) [1]. Основное из них: наличие КЗ витков первичной обмотки измерительного ТН, — не оказывает влияния на напряжение его вторичной обмотки, но принципиально меняет ток в первичной обмотке.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния КЗ в первичной обмотке ТН на его основные параметры (напряжение вторичной обмотки и ток первичной) в физическом макете из двух ТН, подключенных параллельно друг другу. Исследование показало, что изменение числа КЗ витков первичной обмотки одного ТН в системе не влияет не только на основные параметры других ТН в этой же системе, но и на напряжение на зажимах вторичной обмотки самого неисправного ТН. Ток в обмотке с короткозамкнутыми витками интенсивно растет (в используемом макете — в 7,5 раз при КЗ всего 3% витков), что подтверждает удобство индикации аварии в обмотке ТН с помощью этого параметра.

Проведенная расчетная оценка влияния сопротивления нагрузки на выходное напряжение измерительного ТН с учетом КЗ в первичной обмотке ТН показала наличие связи между измеряемой ТН ха-

рактической фазы сети (фазным напряжением) и состоянием изоляции его высоковольтной обмотки. Данная связь может пополнить номенклатуру случаев неправильной работы устройств релейной защиты [9]. Сбор информации о случаях ложного срабатывания систем РЗА, связанных с возникновением дефекта в изоляции ТН, можно осуществлять, например, с применением систем [10].

Литература

1. **Геворкян В.М., Краюшкин К.В.** Алгоритм мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электрических станций // Измерительная техника. 2017. № 3 С. 47—51.
2. **Геворкян В.М. и др.** О повреждениях трансформаторов напряжения в цепях генераторного напряжения электростанций // Электрические станции. 2014. № 1. С. 43—49.
3. **Дымков А.М., Кибель В.М., Тишенин Ю.В.** Трансформаторы напряжения. М.: Энергия, 1975.
4. **Fitzpatrick D.** Analog Design and Simulation Using OrCAD Capture and PSpice. Amsterdam: Elsevier, 2012.
5. **Pat. № 2589752 РФ.** Способ диагностирования технического состояния измерительных ТН в цепи генераторного напряжения электростанций / Геворкян В.М., Краюшкин К.В. // Бюл. изобрет. 2016. № 19.
6. **Вольтметр** универсальный цифровой В7-40. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ч. 1. [Электрон. ресурс] kip-guide.ru/docs/9985-03.pdf (дата обращения 30.04.2018).
7. **Руководство** по эксплуатации осциллографа серии TDS1000B/2000B [Электрон. ресурс] https://ru.tek.com/?utm_source=yandex&utm_medium=ppc&utm_content=brand&utm_campaign=tektronix&yclid=789805261851495070 (дата обращения 30.04.2018).
8. **Дьяков А.Ф. и др.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003.
9. **Шапаренко В.С.** Краткий анализ дефектов и случаев неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики на разной элементной базе в региональной сетевой компании // Электро. 2017. № 2. С. 28—35.
10. **Ухов В.И., Соколова И.С.** Система сбора и представления информации о срабатывании релейной защиты и автоматики // Электрические станции. 2011. № 9. С. 43—45.
11. **Степанов Ю.А., Овчинников А.Г.** Трансформаторы напряжения контроля изоляции 6...10 кВ. Сравнительный анализ моделей // Новости Электротехники. 2003. № 6 (24).
12. **Кадомская К.П., Лаптев О.А.** Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения // Новости Электротехники. 2006. № 6 (42).

Таким образом, все положения, выдвинутые в [1], подтвердились, что указывает на правильный выбор способа анализа состояния изоляции ТН и пути построения системы мониторинга последней. Напомним, что сам мониторинг позволяет лишь предвидеть ожидаемое развитие дефекта, но не предотвратить его развитие. При этом неважно, по какой причине развивается процесс деградации изоляции [11, 12], важно, что он проявляется.

References

1. **Gevorkyan V.M., Krayushkin K.V.** Algorithm Monitoring Sostoyaniya Izolyatsii Izmeritel'nykh Transformatorov Napryazheniya v Tsepi Generatornogo Napryazheniya Elektricheskikh Stantsiy. Izmeritel'naya Tekhnika. 2017;3:47—51. (in Russian).
2. **Gevorkyan V.M. i dr.** O Povrezhdeniyakh Transformatorov Napryazheniya v Tsepyakh Generatornogo Napryazheniya Elektrostantsiy. Elektricheskie Stantsii. 2014;1:43—49. (in Russian).
3. **Dymkov A.M., Kibel' V.M., Tishenin Yu.V.** Transformatory napryazheniya. M.: Energiya, 1975. (in Russian).
4. **Fitzpatrick D.** Analog Design and Simulation Using OrCAD Capture and PSpice. Amsterdam: Elsevier, 2012.
5. **Pat. № 2589752 RF.** Sposob Diagnostirovaniya Tekhnicheskogo Sostoyaniya Izmeritel'nykh TN v Tsepi Generatornogo Napryazheniya Elektrostantsiy. Gevorkyan V.M., Krayushkin K.V. Byul. Izobret. 2016;19. (in Russian).
6. **Vol'tmetr** Universal'nyy Tsifrovoy V7-40. Tekhnicheskoe Opisanie i Instruktziya po Ekspluatatsii. Ch. 1. [Elektron. Resurs] kip-guide.ru/docs/9985-03.pdf (Data Obrashcheniya 30.04.2018). (in Russian).
7. **Rukovodstvo** po Ekspluatatsii Ostsillografa Se-rii TDS1000B/2000B [Elektron. Resurs] https://ru.tek.com/?utm_source=yandex&utm_medium=ppc&utm_content=brand&utm_campaign=tektronix&yclid=789805261851495070 (Data Obrashcheniya 30.04.2018). (in Russian).
8. **D'yakov A.F. i dr.** Elektromagnitnaya Sovmestimost' v Elektroenergetike i Elektrotekhnike. M.: Energoatomizdat, 2003. (in Russian).
9. **Shaparenko V.S.** Kratkiy Analiz Defektov i Sluchayev Nepravil'noy Raboty Ustroystv Releynoy Zashchity i Avtomatiki na Raznoy Elementnoy Baze v Regional'noy Setevoy Kompanii. Elektro. 2017;2:28—35. (in Russian).
10. **Ukhov V.I., Sokolova I.S.** Sistema Sborny i Predstavleniya Informatsii o Sbratyvaniy Releynoy Zashchity i Avtomatiki. Elektricheskie Stantsii. 2011;9:43—45. (in Russian).
11. **Stepanov Yu.A., Ovchinnikov A.G.** Transformatory Napryazheniya Kontrolya Izolyatsii 6...10 kV. Sravnitel'nyy Analiz Modeley. Novosti Elektrotekhniki. 2003;6 (24). (in Russian).
12. **Kadomskaya K.P., Laptev O.A.** Antirezonansnye Transformatory Napryazheniya. Effektivnost' Primeneniya. Novosti Elektrotekhniki. 2006;6 (42). (in Russian).

Сведения об авторах:

Геворкян Владимир Мушегович — кандидат технических наук, профессор кафедры вычислительных машин систем и сетей НИУ «МЭИ», e-mail: GevorkianVM@mpei.ru

Краюшкин Константин Владимирович — инженер-программист АО «Лаборатория информационных технологий», e-mail: jango-kvk@gmail.com

Information about authors:

Gevorkyan Vladimir M. — Ph.D. (Techn.), Professor of Computing Machines, Systems and Networks Dept., NRU MPEI, e-mail: GevorkianVM@mpei.ru

Krayushkin Konstantin V. — Software engineer of JSC «Laboratory of information technologies», e-mail: jango-kvk@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 06.04.2018

The article received to the editor: 06.04.2018