

7. **Berger M. J., Coursey J. S., Zucker M. A., Chang J.** Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions [Электрон. ресурс] <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm> (дата обращения: 20.09.2016).

8. **Pages I., Bertel E., Joffre H., Sklavenitis L.** Atomic Data. Energy loss, Range and Bremsstrahlung yield for 10 keV to 100 MeV. N.Y., London: Academic Press, 1972.

9. **ICRU Report 37** (1984), Stopping Powers for Electrons and Positrons, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, USA.

10. **ГОСТ Р 54500.3—2011.** Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.

Дата принятия: 02.11.2016.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317

Алгоритм мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электростанций

В. М. ГЕВОРКЯН, К. В. КРАЮШКИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: gvm@emc.mpei.ac.ru

Представлен алгоритм мониторинга состояния изоляции измерительных трансформаторов напряжения в цепи генераторного напряжения электростанций. Предложен принцип построения системы мониторинга, и оценена достоверность контроля состояния измерительного трансформатора напряжения.

Ключевые слова: измерительный трансформатор напряжения, система мониторинга, электростанция, короткое замыкание, аварийная ситуация.

The article depicts the algorithm of monitoring of voltage transformers insulation (during normal functioning) in the voltage generation circuits on power plants by indirect signs of insulation state. Was suggested a principle of such monitoring device and was evaluated it's reliability (accuracy assessment of the insulation state).

Key words: voltage transformer, monitoring system, power plant, short circuit, power plant failure.

Актуальность задачи мониторинга в режиме реального времени состояния изоляции высоковольтной обмотки измерительных трансформаторов напряжения (ТН) в цепи генераторного напряжения электростанций определяется серьезными последствиями как экономического, так и социального характера, которые может вызвать отказ в работе измерительных трансформаторов. Опасные нарушения штатного функционирования ТН связаны в основном с коротким замыканием (КЗ) высоковольтной обмотки, что может привести к отключению турбогенератора станции и соответственно недопоставке электроэнергии или к аварии на турбогенераторе и экономическим потерям [1].

В цепи генераторного напряжения электростанций применяют однофазные трансформаторы с заземлённой нейтралью типа ЗНОЛ или ЗНОМ (З — заземляемый трансформатор; Н — трансформатор напряжения; О — однофазный трансформатор; Л — трансформатор с литой изоляцией; М — трансформатор с масляной изоляцией). В последние десятилетия предпочтение отдают ТН типа ЗНОЛ, литая изоляция которых подвержена процессам временной деградации с последующим КЗ витков высоковольтной обмотки [2]. Ис-

пользуемые для контроля изоляции ТН приёмы непригодны для оперативного мониторинга состояния изоляции и неудобны для периодического применения [3].

В последние годы для предотвращения последствий КЗ в первичной обмотке ТН некоторых типов ЗНОЛ предусмотрен предохранитель. Его штатное срабатывание отключает ТН. Тем не менее, возникновение КЗ носит случайный, непредсказуемый для персонала электростанций, характер. Кроме того, в ряде случаев, например, на атомных станциях, применение ТН с предохранителем не предусмотрено техническими условиями из-за существенного изменения конструкций токопроводов цепи генераторного напряжения.

Особенностью цепи генераторного напряжения электростанции является возможность компактного подключения к каждому фазному проводу до 12 однотипных ТН, что позволяет построить принципиально простую систему оперативного контроля за состоянием изоляции ТН. Алгоритм мониторинга, основанный на использовании этой особенности, заключается в измерениях в режиме реального времени одинаковых параметров (например, тока в первичной высоковольтной обмотке или напряжения во вторичной низко-

вольтной обмотке) ТН и сравнении полученных значений (анализе динамики их изменений). Это позволяет выявить ТН, который со временем начинает отличаться от остальных, а значит он потенциально представляет опасность, в том числе, и по состоянию изоляции высоковольтной обмотки. Данный подход исключает влияние на измеряемые характеристики нестабильностей фазных напряжений электростанций, погодных и прочих процессов, воздействующих одновременно и одинаково на все ТН в одной фазе.

Несмотря на идейную простоту, разработка алгоритма мониторинга, основанного на описанной выше особенности, представляет сложную задачу. Однако задача эта выполнима, а конечный продукт, по мнению авторов, будет приемлемым по соотношению сложности конструкции, эксплуатации, надёжности и стоимости.

Постановка задачи. Сведём измерительную задачу к достоверной оценке (измерениям) параметров режима ТН. При этом допустимую погрешность измерений наблюдаемого параметра (ток первичной обмотки ТН) ограничим способом выявления дефектного ТН, основанном на оценке отклонений его режима работы от номинального. Сравним идентичные параметры одинаковых ТН. Допустимая погрешность измерений в этом случае — заданное значение, достаточное для идентификации «регулярного» (из-за КЗ) отклонения. Исходя из диапазона изменений параметра, оценённого ниже, примем отклонение равным 10 %. Оценка погрешности измерений индицируемого параметра включает как систематическую, так и случайные составляющие, связанные со средством измерений — цифровой обработкой с применением аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Алгоритм принятия решения по отключению дефектного ТН от фазного провода представляет отдельную задачу, решение которой требует привлечения статистических данных. Накопление данных возможно после внедрения предлагаемой системы мониторинга.

Моделирование. Разработку и исследование алгоритма мониторинга проводили на модели цепи, содержащей ТН, при условии идеальности фазного провода цепи генераторного напряжения. Предположим, что процесс нарушения

изоляции обмотки можно моделировать появлением в ней короткозамкнутых витков. Поэтому режим ТН моделировали в зависимости от числа таких витков первичной обмотки, подключённой к фазному проводу. Модель ТН построили на примере ТН типа ЗНОЛ.06-24. Процесс моделирования состоял из нескольких этапов.

Параметры ТН. Информация о параметрах ТН, как правило, конфиденциальная. В связи с этим данные, необходимые для проведения оценок режимов работы ТН, можно получить методом анализа различных литературных источников. Учтём, что исправный измерительный ТН функционирует практически в линейном режиме холостого хода, а параметры обмоток и магнитопровода можно определить на основе следующих данных: действующего значения силы тока первичной обмотки $I_1 \approx 50$ мА; напряжений первичной и вторичной обмоток $U_1 \approx 14$ кВ, $U_2 \approx 59$ В; коэффициента трансформации $n = U_1/U_2 \approx 240$; числа витков первичной и вторичной обмоток $W_1 \approx 50000$, $W_2 \approx W_1/n \approx 200$; среднего значения радиуса витка обмотки $r_b \approx 0,1$ м [2].

Исходя из обычной плотности тока $\rho \approx 2,5$ А/мм² медных обмоток ТН, допустимое поперечное сечение проводов первичной обмотки составляет 0,02 мм², а диаметр провода $2r_n = 0,16$ мм. В расчётах будем использовать $r_n = 0,1$ мм.

Активное сопротивление первичной обмотки вычислим как

$$R_1 = \rho 2\pi r_b W_1 / (\pi r_n^2) = A W_1 \approx 16,4 \text{ кОм},$$

где A — коэффициент пропорциональности между числом витков и сопротивлением первичной обмотки.

Запишем индуктивность L_1 первичной обмотки $L_1 = X_1 / \omega = 880$ Гн; $X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \approx 2,795 \cdot 10^5$ Ом; $Z_1 = U_1 / I_1 = 2,8 \cdot 10^5$ Ом, где ω — угловая частота; Z_1 — модуль входного сопротивления со стороны первичной обмотки; I_1 — модуль тока в первичной обмотке.

Индуктивность L_{II} вторичной обмотки при длине средней линии $l \approx 1,5$ м магнитопровода можно рассчитать как

$$L_{II} = \mu_0 \pi r_b^2 W_{II}^2 / l_{cp} = B W_{II}^2 \approx 14,1 \text{ мГн}; \mu_0 = L_1 l_{cp} / [\pi r_b^2 W_1^2] \approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}, \text{ где } B \text{ — коэффициент пропорциональности между индуктивностью и числом витков вторичной обмотки; } \mu \text{ — относительная магнитная проницаемость магнитопровода; } \mu_0 \text{ — магнитная проницаемость вакуума.}$$

Выбор индикатора состояния изоляции. В приближении линейного режима и при отсутствии потоков рассеяния проведём расчёт токов и напряжений ТН (рис. 1) при короткозамкнутой части витков первичной обмотки ТН. Применим систему уравнений состояния в частотной области (т. е. для комплексных напряжений U и токов I):

$$\begin{cases} U_1 = I_2 R_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M_{12} I_1; \\ 0 = I_1 R_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2; \\ U_2 = j\omega M_{13} I_1 + j\omega M_{23} I_2. \end{cases}$$

При $R_{1,2} = A W_{1,2}$, $L_{1,2} = B W_{1,2}^2$ (где омическое сопротивление $R_1 = R_1 + R_2$ и индуктивность $L_1 = L_1 + L_2$ первичной

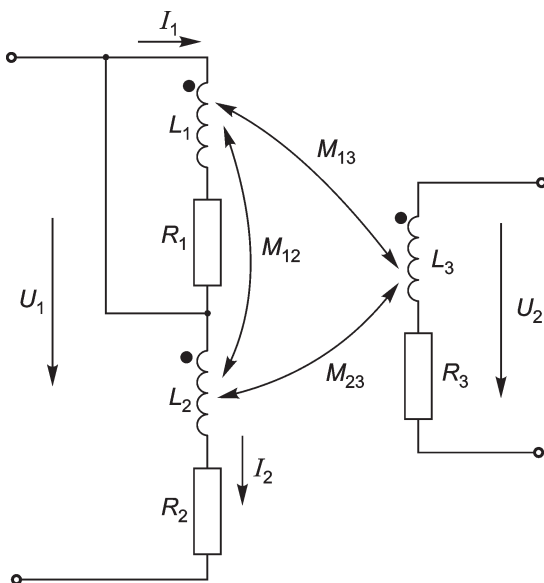


Рис. 1. Схема для расчёта режима работы линейной модели ТН

обмотки ТН связаны с сопротивлениями R_1 , R_2 и индуктивностями L_1 , L_2 её частей W_1 , W_2 согласно рис. 1) имеем

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 j\omega B W_{II} / (A + j\omega B W_I), \quad (1)$$

где $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$ — комплексное напряжение на первичной и вторичной обмотках, соответственно; j — мнимая единица.

Формула (1) указывает на независимость напряжения $\underline{U}_2$ вторичной обмотки от части короткозамкнутых витков в первичной обмотке в приближении линейного режима работы ТН. Однако при этом сила тока первичной обмотки обратно пропорциональна числу рабочих витков и может служить индикатором наличия короткозамкнутых витков в ней:

$$I_2 = \underline{U}_1 [A + j\omega B(W_1 - W_2)] / \{W_2 [A^2 + j\omega AB(W_1 + W_2)]\}.$$

Чувствительность параметра индикации состояния ТН. Проведём исследование на модели линейного трансформатора (K_Linear) в программной среде Cadence OrCAD 16,6 (Capture и PSpice) [4]. Данный программный продукт автоматически определяет реактивное сопротивление обмоток, однако активные сопротивления не учитывает, поэтому их введём в схему расчёта дополнительно.

Исследуем режим холостого хода, соответствующий условию штатного функционирования ТН, и силу тока I_2 в первичной обмотке. При отсутствии КЗ расчётное действующее значение составило $I_{2-p} = 51,05$ мА. Значение I_2 получено для входного напряжения амплитудой около 20 кВ в соответствии с номинальными параметрами ЗНОЛ.06-24. Зависимость силы тока I_2 в первичной обмотке схемы расчёта от количества короткозамкнутых витков в стационарном режиме приведена в таблице.

Результаты моделирования КЗ в первичной обмотке ТН (модель линейного трансформатора)

Число короткозамкнутых витков W_1	Сила тока в первичной обмотке ТН $ I_2 $, А	Отклонение тока в первичной обмотке от номинального, $ I_{2-p} - I_2 $, А
10	0,051059	$12 \cdot 10^{-6}$
100	0,051175	$128 \cdot 10^{-6}$
500	0,052225	0,001178
1000	0,054717	0,003669
5000	0,107383	0,056336
10000	0,214849	0,163803
20000	0,553592	0,502546
30000	1,237437	1,186390
40000	3,291653	3,240606

Из результатов моделирования следует, что отклонение силы тока при 1000 короткозамкнутых витков составляет 3,7 мА (примерно 7 % исходного значения силы тока), а при 5000 короткозамкнутых витков (10 % общего числа витков первичной обмотки) — более 100 % исходного значения силы тока. Полученные данные указывают на сильную зависи-

мость индицируемого параметра (тока в первичной обмотке ТН) от причины аварийной ситуации (части короткозамкнутых витков). Кроме того, полученная зависимость указывает на ожидаемое незначительное помеховое воздействие на систему мониторинга иных погрешностей разного рода (например, температуры, влажности и пр.).

Модель реального ТН. Модель ТН построим на основе магнитопровода из магнитомягкого материала с намагниченностью насыщения $M_s \approx 1,5 \cdot 10^6$ А/м. Точные значения этого и других магнитных параметров модели Джилеса-Атертона, используемой в PSpice, были подобраны экспериментально, исходя из необходимого вида петли гистерезиса материала сердечника и необходимого значения силы тока в первичной обмотке ($\approx 0,05$ А). Геометрические характеристики сердечника были получены ранее из геометрических размеров ТН.

Результаты моделирования с точностью до долей процента идентичны результатам анализа модели линейного ТН, что указывает на недостаточность тока КЗ для насыщения магнитопровода с выбранными параметрами.

Основные элементы конструкции системы мониторинга. Простой, но при этом надёжный и дешёвый способ исполнения системы анализа данных — система на основе микроконтроллера и АЦП. Для измерения силы тока используем измерительный преобразователь — резистор, с которого с помощью АЦП будем снимать мгновенные значения напряжения.

На основании полученных оценок силы тока и динамического диапазона его изменения в первичной обмотке сопротивление резистора может составить около 1 Ом, т. е. достаточно применять АЦП с пределом измерения 5 В. При необходимости, варьируя параметры, можно подстроить систему мониторинга ТН с разными характеристиками. Выбор частоты дискретизации АЦП ограничен частотой высших гармоник тока и в рассматриваемом случае определён стандартным техническим решением АЦП с частотой 32 кГц. Сопротивление резистора на пять порядков меньше полного сопротивления первичной обмотки ТН и поэтому не влияет на режим его работы. Точность номинального значения резистора не влияет на относительные изменения измеряемого тока. Применение измерительных преобразователей тока в виде трансформаторов тока нерационально ввиду малых значений силы тока в первичной обмотке ТН в сочетании с сопротивлением нагрузки трансформаторов не более 0,1 Ом.

Выбор разрядности АЦП следует из установленной нижней границы изменений силы тока в обмотке, соответствующей 1000 короткозамкнутых витков (2 % витков первичной обмотки), т. е. 4 мВ. Примем также допускаемую случайную погрешность, равную 10 % этого значения, т. е. 400 мкВ. При выборе разрядности АЦП остановимся на преобразователе, невосприимчивом к уровню случайной погрешности, соответствующему 400 мкВ. Таким образом, АЦП с пределом измерения 5 В должен иметь минимум 14 разрядов.

Основные источники погрешности измерений. В качестве индикатора состояния изоляции ТН примем силу тока в первичной обмотке трансформатора. При этом, учитывая гармонический вид временной зависимости и заранее исключая возможное влияние случайных факторов на мгновенные значения функции тока, индицируемой величиной будет действующее значение силы тока, усреднённое на ряде

последующих периодов колебаний (например, 5—10). Кроме того, как было отмечено выше, мониторинг будем осуществлять путём сравнения значения силы тока одного ТН с соответствующими значениями силы тока соседних ТН. Это позволит исключить влияние на измеряемые и сравниваемые величины ряда внешних факторов (например быстрых флуктуаций фазного напряжения, различий начальных фаз на разных ТН, связанных с набегами фаз между точками подключения ТН к фазному проводу и между ТН и АЦП, а также с нестабильностью частоты генераторов тактовой частоты).

При нижней границе чувствительности АЦП 400 мкВ несущественны погрешности, обусловленные падением напряжения на погонных сопротивлениях соединительных проводов (максимум 0,0007 % исходного амплитудного значения индицируемой величины) и тепловым шумом ($2,7 \cdot 10^{-16}$ В).

Важно учесть влияние на значения измеренного тока источника помехового сигнала, связанного с электромагнитной обстановкой рабочей среды измерителя. Так как измерительные цепи и датчик съёма полезного сигнала находятся вблизи высоковольтного оборудования, где наблюдаются достаточно мощные переменные электромагнитные поля, можно ожидать помех при передаче анализируемого напряжения в устройство обработки. Эта проблема решается

применением линии передачи в виде витой пары в экране, размещением измерительного резистора номиналом 1 Ом в экране и его включением в рассечку между концом первичной обмотки ТН и заземлением. Таким образом, доминирующей составляющей погрешности измерений будет погрешность измерений силы тока в первичной обмотке ТН.

Анализ вариантов подключения АЦП к системе ТН. Блок из нескольких АЦП. Выделим на каждый ТН отдельный АЦП и разведём эти преобразователи на единой плате вместе с контроллером (рис. 2, а). Необходимость синхронизации генераторов тактовых частот АЦП отпадает, так как достаточно одного тактового генератора для всех преобразователей.

Единственный АЦП. Систему датчиков из предыдущего варианта дополним АЦП с мультиплексированием данных от нескольких датчиков. При таком подходе решаются проблемы синхронизации тактовых генераторов АЦП. Данный вариант системы мониторинга более дешёвый и простой, а значит более надёжный. Рассмотрим особенность погрешности измерений в такой системе. На вход мультиплексора напряжения поступают со всех ТН синхронно, однако на вход АЦП — поочередно, следовательно, в микроконтроллере они будут храниться с задержкой в один такт АЦП. Данная особенность конфигурации системы мониторинга не является источником погрешности, так как измеряются действующие значения индицируемой величины. Вследствие того, что система мониторинга за один такт будет считывать информацию только с одного из 12 ТН, количество выборок на один период одного ТН снизится в 12 раз, что неприемлемо отразится на точности вычислений. Преодоление этой проблемы возможно при увеличении тактовой частоты генератора АЦП, например, до 384 кГц, что соответствует ординарным данным АЦП коммерческого применения.

Несколько АЦП, удалённых от контроллера. Данный вариант предполагает отделение всех АЦП от основной части устройства и контроллера. При этом управление АЦП возможно двумя способами: разместить в основной части устройства генератор тактовых импульсов (ГТИ), который будет рассылать тактовые импульсы всем АЦП, или снабдить каждый АЦП собственными ГТИ (рис. 2, б). В последнем случае АЦП должны быть синхронизированы. Даже при строго одинаковых частотах колебаний вклад в погрешность измерений мгновенных значений вносит фазовый сдвиг начальных отсчётов ГТИ. Любое систематическое отличие тактовых частот ГТИ, как показано в [5], приводит к погрешности, которую можно нивелировать различными способами, вплоть до применения синхронизации на основе ГЛОНАСС.

При использовании одного ГТИ ситуация упрощается тем, что вместо импульса синхронизации непосредственно на АЦП будет поступать тактовый импульс. Задержка поступления данных от АЦП будет равна суммарному времени прохода к нему тактового импульса, а затем данных от АЦП. Влияние погрешностей такого рода аналогично влиянию набега фазы, а следовательно, нивелируется путём анализа действующих значений индицируемого параметра. Таким образом, данный вариант, также как и рассмотренные ранее, возможен к применению.

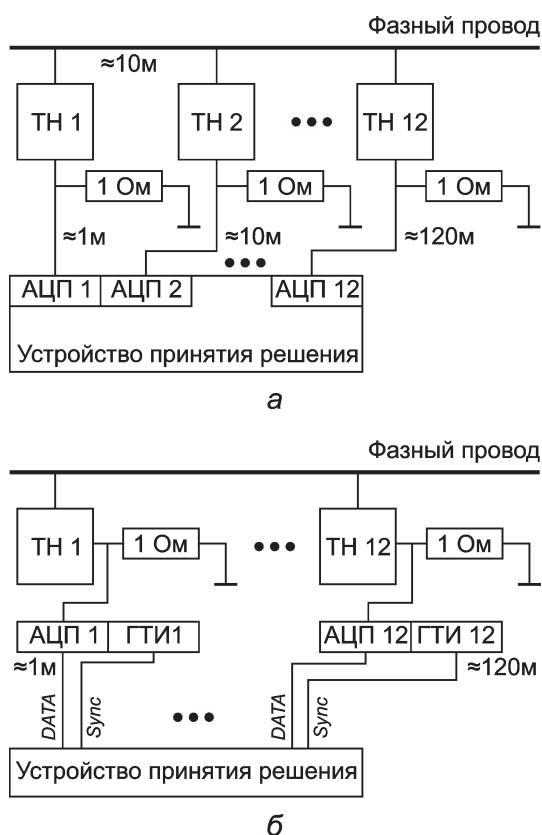


Рис. 2. Схема подключения системы мониторинга при использовании блока из нескольких АЦП (а) и из нескольких удалённых АЦП (б): ГТИ — генератор тактовых импульсов; Sync — сигнал синхронизации ГТИ; DATA — шина данных АЦП

Оценка погрешности измерений действующих значений токов. Ориентируясь на погрешность измерений мгновенного значения напряжения на измерительном сопротивлении для 14-разрядного АЦП с пределом измерений 5 В, составляющую 0,3 мВ на один разряд при амплитудном значении измеряемой силы тока $I_m \approx 70$ мА, относительная погрешность измерения мгновенных значений силы тока i_k составила $\delta \approx \delta_{i_k} / I_m \approx 0,4$. При этом относительная погрешность измеряемого действующего значения силы тока I при 640 отсчётах на периоде T колебаний и при интервале временной дискретизации $\Delta t \pm \delta t = T/640$ (с учётом её нестабильности δt) будет равна

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \approx \sqrt{\left[1/640 (\Delta t \pm \delta t)\right] \sum_{k=1}^{640} i_k^2 (1 \pm 2\delta) (\Delta t \pm \delta t)} \approx I_3 (1 \pm \delta),$$

где I_3 — измеренное (расчётное) значение силы тока в первичной обмотке ТН, полученное с относительной погрешностью $\delta = 0,4$ %.

Заключение. В результате проведённых исследований показана возможность построения системы мониторинга состояния изоляции ТН на основе контроля действующего значения силы тока в первичной обмотке данного ТН. Алгоритм мониторинга базируется на сравнении действующих значений силы тока в первичных обмотках всех ТН, подключённых к одному фазному проводу. Такое подключение нивелирует влияние на систему мониторинга флуктуаций фазного напряжения и иных источников случайных погрешностей.

Выполненная оценка способа контроля состояния изоляции первичной высоковольтной обмотки ТН на основе контроля силы тока в ней показала высокую чувствительность индицируемого параметра к нарушениям изоляции в первичной обмотке ТН: при 1000 короткозамкнутых витков (2 % от числа витков в первичной обмотке) отклонения тока составляют 3,7 мА, а это почти 6 % от исходного значения силы тока в первичной обмотке.

Предлагаемый алгоритм сравнительных оценок, основанный на анализе действующих значений сил токов, обеспечивает погрешность измерений сопоставляемых значений токов в первичных обмотках ТН с применением 14-разрядного АЦП не выше 0,4 %. Такая погрешность в основном обусловлена погрешностью отсчётов АЦП. Остальные факторы формирования погрешности измерений пренебрежимо малы.

Из анализа вариантов компоновки и подключения системы мониторинга к комплексу из 12 ТН следует, что наиболее удобным и надёжным является вариант с несколькими АЦП и микроконтроллером, разведёнными на одной плате как единое устройство.

В заключение необходимо добавить, что при всей привлекательности системы мониторинга защита турбогенератора достигается отключением дефектного ТН. Это требует оценки длительности развития процесса КЗ и сравнения её с быстродействием исполнительных устройств. Авторы предполагают, что развитие КЗ (и рост тока КЗ) поддерживается тепловым процессом, длительность которого может составить единицы секунд, что, например, следует из расчётов, приведённых в [6]. Этого времени достаточно для действия автоматики релейной защиты, которое согласно нормативной документации составляет 0,5 с.

Ожидаемая низкая стоимость измерительного оборудования, определяемая схемотехнической простотой реализации алгоритма, указывает на доступность массового внедрения таких систем, их ориентировочная цена (с учётом стоимости развёртывания) не превысит 50 000 руб.

Литература

1. Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Старшинов В. А., Юзмиев К. Ш., Атаманов В. В. О повреждениях трансформаторов напряжения в цепях генераторного напряжения электростанций // Электрические станции. 2014. № 1. С. 43—49.
2. Дымков А. М., Кибель В. М., Тишенин Ю. В. Трансформаторы напряжения. М.: Энергия, 1975.
3. РД 34.45-51.300—97. Объём и нормы испытаний электрооборудования.
4. Fitzpatrick D. Analog design and simulation using OrCAD Capture and PSpice. USA: Elsevier, 2012.
5. Геворкян В. М., Яшин И. А. Реализация системы точного времени в условиях сильных электромагнитных полей электроустановок высокого напряжения // Измерительная техника. 2011. № 1. С. 42—46.
6. Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Старшинов В. А., Вишняков С. В. О степени опасности термического повреждения обмоток измерительных трансформаторов напряжения при переходных процессах в цепях генераторного напряжения электрических станций // ЭЛЕКТРО. 2015. № 2. С. 33—36.

Дата принятия: 13.05.2016.