

УДК 621.314

EDN EMNJOZ

МЕТОД ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВИ

А.А. Кокорев

ORCID: 0009-0008-1801-2372 e-mail: kokandrey@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***Е.Н. Соснина**

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

Проведен анализ публикационной активности в сфере диагностики силовых трансформаторов (СТ), показавший недостаточный интерес к классам напряжения 6-20 кВ, что объясняется сравнительно невысокой их стоимостью. Рассмотрены основные направления исследований в области диагностики СТ, в качестве перспективного обозначен анализ изменения электрических параметров Т. Показано влияние внутренних дефектов СТ на эксплуатационные параметры и обоснованы причины их недопустимого отклонения от предельных значений. С целью выявления внутренних повреждений на ранней стадии развития разработана методика определения параметров схемы замещения СТ. Разработан алгоритм работы системы диагностики СТ с применением синхронизированных векторных измерений (СВИ) и предложен критерий вывода СТ в ремонт. Приведен вариант реализации с применением устройств СВИ.

Ключевые слова: предиктивная диагностика; синхронизированные векторные измерения; силовой трансформатор; схема замещения; эксплуатационные параметры.

Для цитирования: Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Метод предиктивной диагностики силовых трансформаторов распределительных сетей с использованием СВИ // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 2. С. 37-53. EDN EMNJOZ

A METHOD FOR PREDICTIVE DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS IN DISTRIBUTION NETWORKS USING PMU

A.A. Kokorev

ORCID: 0009-0008-1801-2372 e-mail: kokandrey@gmail.com
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

The article analyzes the publication activity of research in the field of power transformers diagnostics, which showed insufficient interest in the 6-20 kV power transformers, which is explained by their relatively low cost, and examines the main research directions in the field of power transformers diagnostics. A promising direction is the analysis of changes in the electrical parameters of power transformers. The influence of internal power transformers defects on the operational parameters is shown and the reasons for their unacceptable deviation from the limit values are substantiated. In order to identify power transformers internal damage at an early stage of development, a method for determining the parameters of the power transformers equivalent circuit has been developed. An algorithm for the power transformers diagnostic using synchronized vector measurements (PMU) has been developed and a criterion for power transformers repair has been proposed. An implementation option using PMU is given.

Keywords: predictive diagnostics; phasor measurement unit; power transformer; equivalent circuit; operational parameters.

For citation: A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, "A method for predictive diagnostics of power transformers in distribution networks using PMU", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 37-53, 2026. EDN EMNJOZ

I. Введение

Силовые трансформаторы (СТ) 6 (10, 20)/0,4 кВ – наиболее массовые элементы распределительных электрических сетей среднего напряжения, являются источниками энергии низковольтных потребителей: цехов промышленных предприятий, жилого сектора, объектов коммунальной инфраструктуры и др. Значительная часть парка СТ 6-10/0,4 кВ введена в эксплуатацию в 1980-2000 гг. и характеризуется высоким физическим износом, приближаясь к предельному ресурсу. В отличие от трансформаторов класса 110 кВ и выше, оборудование СТ 6-20 кВ, как правило, оснащено минимальным набором защит и встроенных средств диагностики [1]. Традиционная система контроля их технического состояния основана на планово-предупредительных ремонтах (ППР) и периодических испытаниях (отбор масла, замер сопротивления изоляции, оценка характеристик частичных

разрядов при выводе из работы и др.) [2]. Такой подход имеет ряд существенных недостатков: низкая оперативность; невозможность раннего обнаружения развивающихся дефектов, необходимость отключения СТ для проведения большинства испытаний.

Эти недостатки удавалось частично компенсировать относительно стабильными и предсказуемыми режимами работы сетей 6-20 кВ, которые работали с однонаправленным потоком мощности – от питающего центра к потребителю. Однако в последние годы ситуация начала меняться. Активное развитие распределенной генерации (РГ), включая солнечные и ветровые электростанции, газопоршневые установки, а также промышленные когенерационные источники, приводит к трансформации сетей 6-20 кВ в активно-адаптивные системы с двунаправленными потоками энергии. СТ 6-20 кВ, проектировавшиеся для работы в режиме понижения напряжения, теперь испытывают реверсивные нагрузки, повышенную волатильность графика электропотребления, а также воздействие высших гармоник, генерируемых инверторными преобразователями РГ [3].

В этих условиях традиционная система ППР и периодического контроля не просто неэффективна, но и потенциально опасна: она не учитывает ускоренного старения изоляции, вызванного новыми эксплуатационными факторами. Внедрение дорогостоящих систем непрерывного мониторинга анализа растворенных газов и регистрации частичных разрядов для каждого СТ 6-20 кВ экономически неоправданно из-за большого количества единиц оборудования и его относительно невысокой стоимости. Необходима разработка такого подхода к мониторингу технического состояния СТ 6-20 кВ, который, с одной стороны, учитывал бы новые риски, связанные с интеграцией РГ (двунаправленные потоки, гармоники, стохастическая РГ), а с другой – оставался экономически приемлемым для массового применения в распределительных сетях [3, 4] потребителей.

Проведен анализ 110 отечественных и зарубежных научных изданий за 2015-2025 гг., посвященных диагностике и мониторингу СТ, показавший, что основными направлениями исследований являются (рис. 1): анализ методов диагностики СТ 6-20 кВ [5], СТ 35-220 кВ [6-8]; анализ изменения физических и химических свойств изоляционного масла (анализ растворенных газов, влагосодержание, температура вспышки паров масла и др.) [9-11]; контроль температуры обмоток и масла, телевизионный контроль трансформатора [12-14]; акустический и вибрационный мониторинг; анализ деформации обмоток по низковольтным импульсам [15]; применение нейронных сетей, цифровых двойников и машинного обучения для поиска внутренних повреждений [16-17]; контроль механических параметров с помощью частотного анализа частичных разрядов [18-19]; системы для диагностирования межвитковых замыканий с помощью устройств синхронизи-

рованных векторных измерений (УСВИ) [20, 21]; совершенствование аналитических методов для диагностики [22, 23]; анализ изменения электрических параметров трансформатора: эксплуатационных параметров СТ, параметров изоляции и т.д.

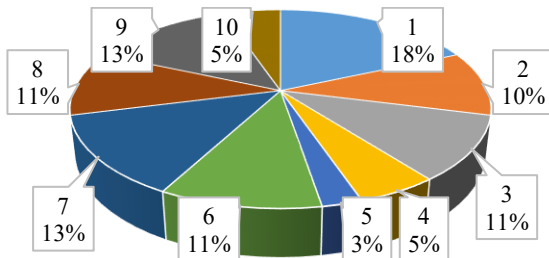


Рис. 1. Направления исследований в области диагностики СТ

Fig. 1. Research directions in the field of PT diagnostics

На рис. 1 представлены: 1 – анализ методов; 2 – анализ изменения физических и химических свойств изоляционного масла; 3 – тепловой мониторинг; 4 – акустический и вибрационный мониторинг; 5 – анализ деформации обмоток по низковольтным импульсам; 6 – применение нейронных сетей, цифровых двойников и машинного обучения; 7 – контроль механических параметров с помощью частотного анализа частичных разрядов; 8 – системы для диагностирования межвитковых замыканий с помощью УСВИ; 9 – совершенствование аналитических методов; 10 – анализ изменения электрических параметров.

Проведенный анализ публикаций показал, что только ~30 % посвящены СТ 6-20 кВ, ограничиваясь при этом общими рекомендациями к организации и совершенствованию систем диагностики. Учитывая значительную долю СТ 6-20 кВ в сетевом хозяйстве, повышение требований к надежности и экономические ограничения на внедрение сложных систем, необходимы разработка и внедрение новых методик диагностики и мониторинга таких СТ. Цель исследований – разработка методики, учитывающей изменение свойств материалов активной части СТ при ее нагреве. Методика позволит разработать алгоритм мониторинга СТ с более «четкими» критериями оценки его технического состояния.

II. Влияние внутренних повреждений на эксплуатационные параметры силовых трансформаторов

В табл. 1 представлены предельные отклонения основных эксплуатационных параметров СТ [24]: ток и потери мощности холостого хода (XX), напряжение и потери мощности короткого замыкания (КЗ).

Таблица 1.

Предельные отклонения измеряемых параметров СТ от нормированных

Table 1.

Permissible deviations of the measured PT parameters from the normalized ones

Наименование параметра	Предельное отклонение, %
Коэффициент трансформации	$\pm 0,5$
Напряжение КЗ	± 10
Потери КЗ	10
Потери ХХ	15
Суммарные потери	10
Ток ХХ	30

Высокие предельные значения отклонения параметров обусловлены погрешностью измерительных приборов, низким качеством электрической энергии и ее стабильности, влиянием внешних факторов (температура активной части СТ и др.) на момент утверждения нормативного документа [25]. В процессе эксплуатации СТ происходят непрерывные необратимые процессы старения изоляции, связанные с увлажнением, нагревом, динамическими нагрузками и перенапряжением. Образуются сосредоточенные и распределенные дефекты. В табл. 2 представлены основные виды дефектов СТ 6-20 кВ и их влияние на эксплуатационные параметры.

Таблица 2.

Влияние дефектов СТ на его параметры

Table 2.

Influence of transformer defects on its parameters

Дефект	Изменение параметра
Межвитковое замыкание	Уменьшение потерь и напряжения КЗ
Деформация обмоток после КЗ	Увеличение напряжения КЗ
Замкнутый контур в магнитопроводе	Увеличение потерь и тока ХХ
Изменение свойств ферромагнитного материала	Изменение потерь и тока ХХ

Развитие информационных технологий, повышение производительности и снижение стоимости микропроцессорной техники и силовой электроники позволяют разрабатывать новые методы диагностики СТ.

III. Разработка структурной и функциональной схем системы мониторинга

Перспективным направлением диагностики СТ является контроль электрических параметров с применением УСВИ [26], что обусловлено:

- влиянием любых видов дефектов в СТ на его эксплуатационные параметры;
- высоким классом точности первичных преобразователей измеряемых величин (измерительных трансформаторов тока и напряжения);

- высокой точностью аналогово-цифровых преобразований измеряемых величин;
- возможностью получения и обработки сигналов в реальном времени;
- получением измерительной информации в одни и те же моменты времени;
- получением новых, производных, параметров из измеренных величин;
- разработкой многопараметрических систем диагностики;
- использованием цифровых двойников;
- применением нейросетевых технологий для анализа.

На рис. 2 представлена структурная схема системы диагностики СТ. Во время работы на объект диагностирования DO (*diagnostic object*) оказывается эксплуатационное воздействие OI (*operational impact*). Также на объект диагностирования DO устанавливаются датчики S (*sensors*), информация с которых передается в блоки средства технического диагностирования TDT (*technical diagnostic tools*): блок расчета диагностического параметра $DPCB$ (*diagnostic parameter calculation block*) и задающее устройство SD (*setting device*).

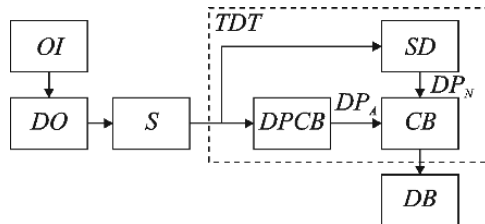


Рис. 2. Структурная схема системы диагностики СТ

Fig. 2. Block diagram of the power transformer diagnostic system

В [27] отмечалось влияние внешних факторов на характеристики объекта диагностирования, в частности на СТ, в нормальном (неповрежденном состоянии). Поэтому информация с датчиков S необходимо направлять и в задающее устройство SD с целью получения более адекватных результатов диагностирования. Информация с блоков $DPCB$ и SD передается в блок сравнения CB (*comparison block*), сопоставляющий по заданному критерию диагностические параметры фактического DPA (*diagnostic parameters of the actual state*) и нормального DPN (*diagnostic parameters of the normal state*). В результате сравнения формируется решение и передается в блок постановки диагноза DB (*diagnosis block*), информирующий обслуживающий персонал о результатах диагностирования.

На рис. 3 представлена функциональная схема системы диагностики СТ при применении «облачных» (сетевых) технологий.

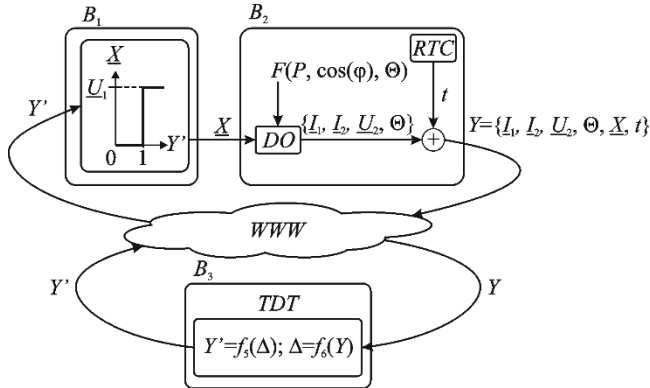


Рис. 3. Функциональная схема системы диагностики СТ

Fig. 3. Functional diagram of the power transformer diagnostic system

На объект диагностирования DO – СТ, установленный в блоке $B2$ (например, в трансформаторной подстанции (ТП)), оказывает влияние внешняя среда F : подключенная нагрузка мощностью P и с коэффициентом мощности $\cos\varphi$, температура окружающей среды Θ и т.д. и напряжение питания U_1 , оказывающее возмущающее воздействие X .

С помощью программно-аппаратных устройств (датчиков S) проводится определение координат состояния $\{I_1, I_2, U_2, \Theta\}$, характеризующих состояние объекта управления. Координаты состояния являются зависимыми функциями от возмущающего воздействия X , которым является напряжение питания СТ U_1 , и влияния внешней среды F :

$$I_1 = f_1(\underline{X}, F);$$

$$I_2 = f_2(\underline{X}, F);$$

$$U_2 = f_3(\underline{X}, F).$$

Координаты состояния являются непрерывно изменяющимися величинами, поэтому для обработки координат состояния и получения достоверной информации о состоянии объекта необходимо координатам состояния присвоить метки времени t . Метки времени могут быть получены от часов реального времени RTC (*Real-Time Clock*). Таким образом формируется вектор состояния:

$$\mathbf{Y} = \{I_1, I_2, U_2, \Theta, \underline{X}, t\}.$$

Вектор состояния \mathbf{Y} передается в «облако» (WWW), где осуществляется его накопление и систематизация.

IV. Реализация системы диагностики с применением УСВИ и «облачных» технологий

Ключевым элементом схемы диагностирования СТ является блок *TDT*, в который закладывается основной алгоритм работы системы диагностики. На рис. 4 представлен алгоритм диагностирования СТ по параметрам схемы замещения.

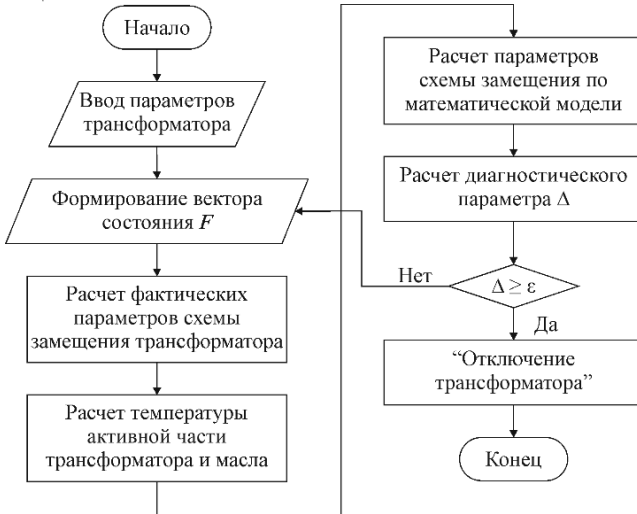


Рис. 4. Алгоритм диагностирования СТ

Fig. 4. Power transformer diagnostic algorithm

Параметры схемы замещения определяются решением системы уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа Т-образной схемы замещения (рис. 5) для двух последовательных моментов времени (текущего n и предыдущего k), отличающихся режимом работы СТ [28]:

$$\begin{cases} \underline{U}_{1,n}^{(i)} = \underline{U}_{2,n}^{(i)} + \underline{I}_{1,n}^{(i)} \underline{Z}_1 + \underline{I}_{2,n}^{(i)} \underline{Z}_2 \\ \underline{U}_{1,k}^{(i)} = \underline{U}_{2,k}^{(i)} + \underline{I}_{1,k}^{(i)} \underline{Z}_1 + \underline{I}_{2,k}^{(i)} \underline{Z}_2, \\ \underline{Z}_0^{(i)} = \frac{\underline{U}_{1,n}^{(i)} - \underline{I}_{1,n}^{(i)} \underline{Z}_1}{\underline{I}_{1,n}^{(i)} - \underline{I}_{2,n}^{(i)}} \end{cases}$$

где $\underline{U}_{1,n}^{(i)}$, $\underline{U}_{1,k}^{(i)}$, $\underline{I}_{1,n}^{(i)}$, $\underline{I}_{1,k}^{(i)}$ – напряжения и токи первичной (обмотки высшего напряжения (ВН)) обмотки СТ i -й последовательности для моментов времени n и k ; $\underline{U}_{2,n}^{(i)}$, $\underline{U}_{2,k}^{(i)}$, $\underline{I}_{2,n}^{(i)}$, $\underline{I}_{2,k}^{(i)}$ – приведенные напряжения и токи вторичной (обмотки низшего напряжения (НН)) обмотки к напряжению обмотки

ВН СТ i -й последовательности для моментов времени n и k ; $\underline{Z}_1^{(i)}$ – комплексной сопротивление обмотки ВН i -й последовательности; $\underline{Z}_2^{(i)}$ – приведенное комплексной сопротивление обмотки НН i -й последовательности; $\underline{Z}_0^{(i)}$ – комплексное сопротивление ветви намагничивания i -й последовательности Т-образной схемы замещения СТ, $i = 1$ – прямая; $i = 2$ – обратная; $i = 0$ – нулевая последовательности.

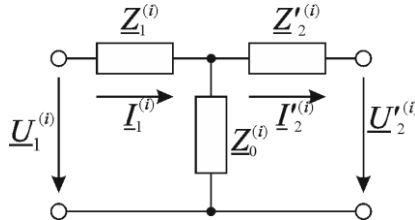


Рис. 5. Т-образная схема замещения СТ прямой ($i = 1$) и обратной ($i = 2$) последовательностей

Fig. 5. T-shaped equivalent circuit of a power transformer for the positive ($i = 1$) and negative ($i = 2$) sequences

Критерием возникновения виткового замыкания, как наиболее распространенного вида повреждения СТ [29], является изменение мнимой составляющей приведенного комплексного сопротивления обмотки НН прямой последовательности $\text{Im}(\underline{Z}_2^{(1)})$, а критерием, дающим информацию об объеме замкнувшихся витков, – модуль комплексного сопротивления ветви намагничивания прямой последовательности $|\underline{Z}_0^{(1)}|$ [30].

В процессе нормальной эксплуатации СТ возникают потери мощности, приводящие к нагреву его активной части. Изменение температуры активной части влечет изменения физических свойств материалов, из которых изготовлена активная часть СТ. Изменение свойств материалов приводит к изменению эксплуатационных параметров, что отражается на параметрах схемы замещения [27, 30].

Указанные параметры схемы замещения ($\text{Im}(\underline{Z}_2^{(1)})$ и $|\underline{Z}_0^{(1)}|$) принадлежат множеству DP_N допустимых (нормальных) N значений (рис. 6). Каждый элемент A_N множества DP_N характеризуется температурой Θ активной части СТ [27]. При возникновении внутренних повреждений D расположение (топология) множества DP_N на плоскости параметров $\text{Im}(\underline{Z}_2^{(1)}) - |\underline{Z}_0^{(1)}|$ меняется (DP_D).

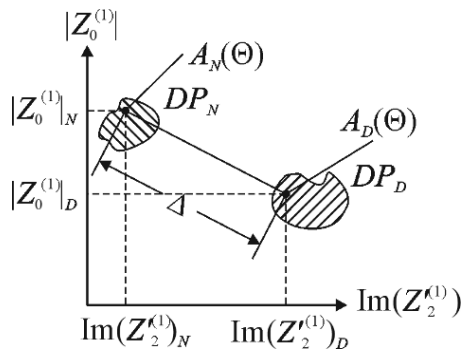


Рис. 6. Плоскость параметров $\text{Im}(Z_2^{(1)}) - |Z_0^{(1)}|$ состояния СТ

Fig. 6. Plane of $\text{Im}(Z_2^{(1)}) - |Z_0^{(1)}|$ parameters of the power transformer condition

Критерием «отключения трансформатора» («вывода в ремонт») СТ является расстояние между точками A_N и A_D :

$$\Delta = \sqrt{\left(\text{Im}(Z_2^{(1)})_N - \text{Im}(Z_2^{(1)})_D\right)^2 + \left(|Z_0^{(1)}|_N - |Z_0^{(1)}|_D\right)^2}.$$

Средство технического диагностирования TDT формирует сигнал управления Y' согласно условию:

$$Y' = \begin{cases} 1, & \Delta \leq \varepsilon \\ 0, & \Delta > \varepsilon \end{cases},$$

где ε – предельное расстояние (отклонение), обусловленное погрешностью измерительно-вычислительного тракта.

Реализация предложенной структурной схемы системы диагностики с применением «облачных» технологий возможна с применением УСВИ (рис. 7). Предполагается два комплекта УСВИ, устанавливаемых в ТП. Первый комплект УСВИ ($PMU1$) получает мгновенные значения тока i_1 и напряжения u_1 с шин 6–20 кВ от измерительных трансформаторов тока $TA1$ и напряжения $TV1$, сигналы точного времени t от часов реального времени RTC и вычисляет комплексные значения тока \underline{I}_1 и напряжения \underline{U}_1 основной частоты.

Второй комплект ($PMU2$) получает мгновенные значения тока i_2 и напряжения u_2 с шин 0,4 кВ от измерительных трансформаторов тока $TA2$ и напряжения $TV2$, сигналы точного времени t от часов реального времени RTC , вычисляет комплексные значения тока \underline{I}_2 и напряжения \underline{U}_2 . УСВИ имеет аналоговые и цифровые входы для подключения дополнительных внешних датчиков (например датчик температуры ΘTE).

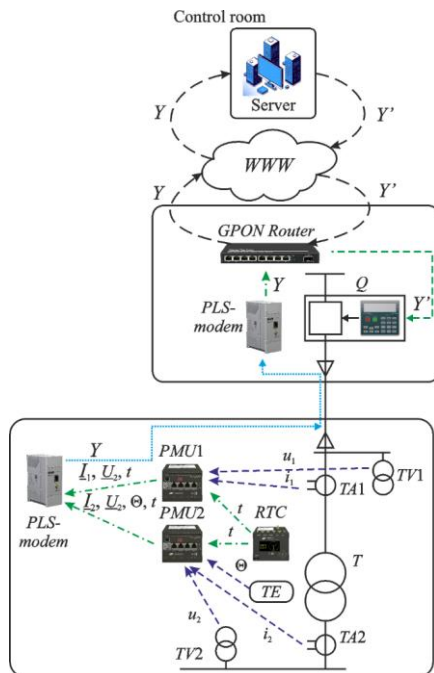


Рис. 7. Реализация системы диагностики с применением УСВИ и «облачных» технологий

Fig. 7. Implementation of a diagnostic system using PMU devices and cloud technologies

Полученная информация формирует вектор состояния Y и передается по силовой сети с помощью *PLS*-модемов (*PLS-modem*) в сетевой концентратор (*GPON Router*) распределительной подстанции (ПП). Вектор состояния передается и хранится в «облаке» (*WWW*) и может быть запрошен центром обработки данных (*Server*) диспетчерской (*Control room*). На *Server* проводится обработка вектора состояния Y и формируется сигнал управления Y' (принимается решение о продолжении $Y' = 1$ или отключении $Y' = 0$ СТ) согласно описанной выше методике. Сигнал управления Y' передается на панель управления выключателя Q через «облако» *WWW*.

V. Выводы

Предложенный метод предиктивной диагностики, основанный на СВИ и облачных вычислениях, обладает высокой чувствительностью к внутренним дефектам, устойчивостью к внешним факторам (благодаря

учету температуры активной части СТ) и экономической целесообразностью для широкого внедрения в распределительных сетях 6-20 кВ СЭС потребителей.

Методика позволяет выявлять внутренние повреждения на ранней стадии, учитывать влияние температуры активной части на параметры схемы замещения, а также принимать решение о выводе СТ в ремонт на основе объективного количественного критерия, а не планового графика.

Для дальнейшего развития метода целесообразны экспериментальная апробация на реальных СТ с искусственно создаваемыми дефектами, а также исследование влияния высших гармоник и несимметрии, характерные для сетей с РГ.

© Кокорев А.А., 2026

© Соснина Е.Н., 2026

Поступила в редакцию 01.06.2026

Принята к публикации 10.06.2026

Received 01.06.2026

Accepted 10.06.2026

Библиографический список

- [1] РД 34.46.501 Инструкция по эксплуатации трансформаторов.
- [2] Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 г. N 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210070065> (дата обращения 23.05.2024).
- [3] Исозода Д.Т, Махсумов И.Б., Давлатзода А.Н. Распределенная генерация и ее влияние на режим работы электрической сети // Водные ресурсы, энергетика и экология. 2024. Т. 4, № 3. С. 110-117.
- [4] Нищенко А.М. Важность разработки систем мониторинга силовых трансформаторов на энергетических объектах // Вестник науки. 2024. Т. 1. №. 1 (70). С. 341-344.
- [5] Русов В.А. Мониторинг сухих и маслонаполненных распределительных трансформаторов 6-35 кВ в условиях цифровых подстанций // Энергоэксперт. 2019. № 1(69). С. 44-47.
- [6] Tenbohlen S., Coenen S., Djamali M., Müller A., Samimi M.H., Siegel M. Diagnostic Measurements for Power Transformers // Energies. 2016. №9. P. 347.
- [7] Монастырский А.Е. Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 97–108. DOI: 10.18721/JEST.27309.
- [8] Русов В.А. Управление эксплуатацией маслонаполненных и сухих силовых трансформаторов 6-35 кВ на основе результатов работы систем мониторинга // Энергоэксперт. 2021. № 2(78). С. 54-59.

- [9] Яхья А.А., В.М. Левин. Оценка эффективности мониторинга технического состояния трансформаторов на основе анализа растворенных газов // Журнал Сибирского федерального университета. 2020. Т. 13, № 4. С. 438-448. DOI: 10.17516/1999-494X-0235.
- [10] Серебряков А.С., Семенов Д.А., Сбитнев Е.А., Сидорова А.В. Влияние старения трансформаторного масла на остаточный ресурс трансформатора и его диагностические параметры // Электротехника. 2023. № 12. С. 71-78.
- [11] Назарычев А.Н., Мельникова О.С., Сулыненков И.Н. Диагностика главной изоляции силовых трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла // Электричество. 2022. № 9. С. 22-32.
- [12] Гузанов С.С., Иванов С.Н. Исследование системы мониторинга и контроля параметров температуры сухих трансформаторов ТСЗ // Трибуна ученого. 2023. №1. С. 28-37.
- [13] Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Об учете коэффициента температурной коррекции при мониторинге силового трансформатора 6-20 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 2. С. 69-82.
- [14] Козубай И., Калматов У.А., Борукеев Т.С. Разработка технических средств и метода диагностики повреждения обмоток силового масляного трансформатора 10/0,4 кВ // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23. № 4. С. 21-28.
- [15] Губарев В.А. Способы вибрационного контроля силовых трансформаторов // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019): сборник трудов, Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 12–13 ноября 2019 г. С. 166-170.
- [16] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Совина А.Н. Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах // Электричество. 2022. № 10. С. 34-44.
- [17] Maulik B. Raichura, Nilesh G. Chothani, Dharmesh D. Patel Identification of internal fault against external abnormalities in power transformer using hierarchical ensemble extreme learning machine technique // IET Science, Measurement & Technology. 2020. №14. С. 111-121.
- [18] Тенболен С., Белтл М., Сигал М. Мониторинг частичных разрядов в силовых трансформаторах с помощью УВЧ датчиков // Энергоэксперт. 2018. № 3(67). С. 54-58.
- [19] Ларин В.С. Входная проводимость и частотная характеристика обмотки силового трансформатора // Электричество. 2022. № 8. С. 33-39.
- [20] Алюнов А.Н., Вяткина О.С., Немировский А.Е. Об эффективности цифровой системы проактивной диагностики силовых трансформаторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5(154). С. 966–976. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-966-976
- [21] Куликов С, Толстых М. Разработка алгоритмов и способов мониторинга состояния силовых трансформаторов в распределительных сетях на основе синхронизированных векторных измерений // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № 2(33). С. 8-17.
- [22] Мустафин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Сиразутдинов Ф.Р., Губаев Д.Ф., Гавриленко А.Н. Разработка метода определения витковых замыканий в обмотке

- трехфазного трансформатора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 46-58. DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.
- [23] Каппес А.Д., Апросин К.И. Алгоритмы защиты трансформатора для выявления внутренних коротких замыканий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23. № 2. С. 18–29. DOI: 10.14529/power230202.
- [24] ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
- [25] ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. Введ. 1990-01-01. М.: Издательство стандартов, 1989.
- [26] Пирогов П.А., Дмитриев С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для мониторинга состояния силовых трансформаторов // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XII Международной научно-технической конференции, Нижний Новгород, 16–19 мая 2022 года. Том Часть I. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022. С. 170-173.
- [27] Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Оценка технического состояния силовых трансформаторов 6–20 кВ по параметрам схемы замещения // Вестник МЭИ. 2025. № 4. С. 22—30. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-4-22-30.
- [28] Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Расчет параметров схемы замещения трансформатора 6-20 кВ по результатам синхронизированных векторных измерений // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2025. С. 255-256.
- [29] Яхутль Б.Р., Волкова У.С., Федотов И.А. Повреждения силовых трансформаторов 10/0,4 кВ // сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований" (Уфа), 2022. С. 163-167.
- [30] E. Sosnina, R. Bedretdinov and A. Kokorev, "Study of the Performance Characteristics of a MV Transformer, Taking into Account Heating," 2025 6th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering (SGEE), Shanghai, China, 2025, pp. 327-330, doi: 10.1109/SGEE68429.2025.11385641

References

- [1] RD 34.46.501 Instruction for Operation of Transformers
- [2] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated Aug. 12, 2022 no. 811 "On the approval of the Rules for the technical operation of electrical installations of consumers of electrical energy [Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej elektricheskoy energii]", *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210070065> [Accessed: May 23, 2024] (in Russian).
- [3] D.T. Isozoda, I.B. Makhsumov and A.N. Davlatzoda, "Distributed generation and its influence on the operating mode of the electric power grid", *Water Resources, Energy and Ecology*, vol. 4, no. 4(3), pp. 110-117, 2024.
- [4] A.M. Nishchenkov, "The importance of developing monitoring systems for power transformers at energy facilities", *Bulletin of Science*, vol. 1, no. 1(70), pp. 341-344, 2024.

-
- [5] V.A. Rusov, "Monitoring of dry and oil-filled distribution transformers of 6-35 kV in digital substation conditions", *Energy Expert*, no. 1(69), pp. 44-47, 2019.
- [6] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M.H. Samimi, M. Siegel, "Diagnostic Measurements for Power Transformers", *Energies*, no. 9, pp. 347, 2016.
- [7] A.E. Monastyrsky, "Modern systems for monitoring the technical condition of power oil-filled transformers", *Materials Science. Power Engineering*, no. 27(3), pp. 97-108, 2021. DOI: 10.18721/JEST.27309.
- [8] V.A. Rusov, "Operation management of oil-filled and dry-type power transformers of 6-35 kV based on the results of monitoring systems", *Energy Expert*, no. 2(78), pp. 54-59, 2021.
- [9] A.A. Yahya and V.M. Levin, "Evaluation of the effectiveness of monitoring the technical condition of transformers based on dissolved gas analysis", *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and Technologies*, no. 13(4), pp. 438-448, 2020. DOI: 10.17516/1999-494X-0235.
- [10] A.S. Serebryakov, D.A. Semenov, E.A. Sbitnev and A.V. Sidorova, "Influence of transformer oil aging on the residual life of the transformer and its diagnostic parameters", *Russian Electrical Engineering*, no. 12, pp. 71-78, 2023.
- [11] A.N. Nazarychev, O.S. Melnikova and I.N. Sulynenkov, "Diagnostics of main insulation of power transformers based on the statistical criterion of oil dielectric strength", *Electricity*, no. 9, pp. 22-32, 2022.
- [12] S.S. Guzanov and S.N. Ivanov, "Study of the monitoring and control system for temperature parameters of dry-type TSZ transformers", *Tribune of the Scientist*, no. 1, pp. 28-37, 2023.
- [13] A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, "On consideration of temperature correction coefficient in 6-20 kV power transformer monitoring", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 69-82, 2024.
- [14] I. Kozubai, U.A. Kalmatov and T.S. Borukeev, "Development of technical means and a method for diagnosing winding damage in a 10/0.4 kV power oil transformer", *Bulletin of KRSU*, no. 23(4), pp. 21-28, 2023.
- [15] V.A. Gubarev, "Methods of vibration control of power transformers", *Energy Efficiency and Energy Security of Production Processes (EEPP-2019): collection of proceedings. Tolyatti: Tolyatti State University*, pp. 166-170, 2019.
- [16] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and A.N. Sovina, "Using machine learning and artificial neural networks for detecting turn-to-turn faults in power transformers", *Electricity*, no. 10, pp. 34-44, 2022.
- [17] B. Raichura Maulik, Nilesh G. Chothani, Dharmesh D., "Patel Identification of internal fault against external abnormalities in power transformer using hierarchical ensemble extreme learning machine technique", *IET Science, Measurement and Technology*, no. 14, pp. 111-121, 2020.
- [18] S. Tenbolon, M. Beltl and M. Sigal, "Partial discharge monitoring in power transformers using UHF sensors", *Energy Expert*, no. 3(67), pp. 54-58, 2018.
- [19] V.S. Larin, "Input admittance and frequency response of a power transformer winding", *Electricity*, no. 8, pp. 33-39, 2022.
- [20] A.N. Alyunov, O.S. Vyatkina and A.E. Nemirovskiy, "On efficiency of digital system of power transformer proactive diagnostics", *Proceedings of Irkutsk State Tech-*

- nical University*, vol. 24, no. 5(154), pp. 966-976, 2020. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-966-976
- [21] S. Kulikov and M. Tolstykh, "Development of algorithms and methods for condition monitoring of power transformers in distribution networks based on synchronized vector measurements", *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 2(33), pp. 8-17, 2024.
- [22] R.G. Mustafin, Yu.V. Piskovatsky, F.R. Sirazutdinov, D.F. Gubaev and A.N. Gavrilenko, "Development of a method for determining turn-to-turn faults in the winding of a three-phase transformer", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Energy*, no. 23(1), pp. 46-58, 2021. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.
- [23] A.D. Kappes and K.I. Aprosin, "Transformer protection algorithms for detecting internal short circuits", *Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"*, no. 23(2), pp. 18-29, 2023. DOI: 10.14529/power230202.
- [24] GOST R 52719-2007 *Power transformers. General specifications*.
- [25] Power transformers. Electromagnetic test methods, GOST 3484.1-88, Jan. 1990.
- [26] P.A. Pirogov and S.A. Dmitriev, "Application of synchronized vector measurement technology for condition monitoring of power transformers", In *Electric Power Engineering through the Eyes of Youth: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev*, Part I, pp. 170-173, 2022.
- [27] A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, "Assessment of the technical condition of 6–20 kV power transformers based on equivalent circuit parameters", *Bulletin of MPEI*, no. 4, pp. 22-30, 2025. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-4-22-30.
- [28] A.A. Kokorev and E.N. Sosnina, "Calculation of equivalent circuit parameters of a 6–20 kV transformer based on synchronized vector measurement results", In *Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems: Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference Cheboksary: Chuvash State University named after I. N. Ulyanov*, pp. 255-256, 2025.
- [29] B.R. Yakhutl, U.S. Volkova and I.A. Fedotov, "Damage to 10/0.4 kV power transformers", In *Collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference Sterlitamak. Ufa: Agency for International Research LLC*, pp. 163-167, 2022.
- [30] E. Sosnina, R. Bedretdinov and A. Kokorev, "Study of the Performance Characteristics of a MV Transformer, Taking into Account Heating", 2025 6th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering (SGEE), Shanghai, China, 2025, pp. 327-330, doi: 10.1109/SGEE68429.2025.11385641

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кокорев Андрей Александрович, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, Российская Федерация.

Andrey A. Kokorew, assistant professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Elena N. Sosnina, D. Sci. (Eng), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation