

УДК 621.319.4

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-33-40

### Измерительный комплекс для определения режима работы силовых трансформаторов

*А. Е. Фокеев*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск Россия  
*М. Л. Новоселов*, старший преподаватель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск Россия

*Приведен краткий обзор использования цифровых технологий для оценки технического состояния и ресурса силовых трансформаторов. Показано, что обследование действующих трансформаторных подстанций должно производиться с использованием средств, позволяющих определить фактический режим работы силовых трансформаторов. Предложено использовать мгновенные значения токов и гармонический анализ для определения фактического режима работы силовых трансформаторов и оценки выработки ресурса изоляции обмоток.*

*Приведены состав и описание принципа работы и визуализация результатов, получаемых посредством измерительного комплекса, назначением которого является определение фактического режима работы силовых трансформаторов. Измерительный комплекс позволяет выполнять обследование действующих трансформаторных подстанций с мощностью силовых трансформаторов до 4000 кВА напряжением 10(6)/0,4(0,69) кВ.*

*Определение фактического режима работы силовых трансформаторов и параметров, характеризующих ресурс работы силовых трансформаторов, производится с учетом воздействия несинусоидальных токов нагрузки и температуры окружающей среды. Используются математические модели сухих силовых трансформаторов с воздушно-барьерной изоляцией с естественным и принудительным охлаждением и масляных силовых трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией масла. Модели учитывают влияние высших гармонических составляющих тока нагрузки и фактическое значение температуры окружающей среды. Результаты определения фактического режима работы силовых трансформаторов визуализированы посредством трехфазных годографов тока, что обеспечивает наглядность отображения полученной информации.*

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы, скорость термического старения изоляции, снижение срока службы, высшие гармонические составляющие, температура окружающей среды, трехфазный годограф.

#### Введение

Техническое обслуживание и ремонт силовых трансформаторов, как правило, осуществляется в соответствии с принятой на предприятии системой ремонта: планово-предупредительной, аварийно-восстановительной, – или ремонтом по фактическому техническому состоянию. Все чаще можно встретить реализацию стратегии обслуживания силовых трансформаторов по результатам диагностирования [1].

В настоящее время существует большое количество цифровых технологий, позволяющих обрабатывать результаты измерений, анализировать режимы работы и прогнозировать состояние силовых трансформаторов. Например, в [2] рассматриваются аспекты мониторинга и ремонта силовых трансформаторов по фактическому техническому состоянию, посредством применения диагностических систем с контролем различных параметров рабочего режима: уровень вибрации, акустические колебания и хроматографический анализ масла. В [3] пред-

лагается использование технологии цифровых двойников, для имитации работы реальных силовых трансформаторов в различных режимах и интеграция полученных результатов в SCADA-системы. В [4] предлагается использовать нейросетевые системы для прогнозирования остаточного ресурса силовых трансформаторов, а в [5] приводятся результаты использования такой системы на примере анализа содержания водорода в масле силового трансформатора. В [6] рассматривается реализация цифровой обработки данных в среде LabVIEW при испытании силового трансформатора методом наносекундных низковольтных импульсов. Вышеперечисленные подходы предлагают использование современных цифровых технологий для выявления уже имеющихся и развивающихся дефектов силовых трансформаторов.

В [7] рассматривается вопрос оценки износа изоляции обмоток силового маслонаполненного трансформатора путем стохастического прогнозирования динамики нагрузки, температуры окружающей среды, имитационного моделирова-

ния изменений технического состояния бумажной изоляции и трансформаторного масла. Таким образом, оценка производится без учета реальных значений параметров, характеризующих электрическую нагрузку.

Актуальным является вопрос определения фактического режима работы силовых трансформаторов на действующих трансформаторных подстанциях, для которых характерным является увеличение доли нелинейной электрической нагрузки в условиях повсеместного использования устройств силовой промышленной электроники и бытовых электронных устройств. Особенного внимания требуют трансформаторные подстанции, обеспечивающие электроснабжение новых объектов (ввиду отсутствия достоверных сведений о параметрах электрической нагрузки на стадии проектирования) и объектов, функциональное назначение которых было кардинально изменено. Например, здания производственных цехов используются в качестве торговых или офисных центров. Для этих целей необходимо использовать мгновенные значения тока электрической нагрузки.

В данной статье приведено описание принципа работы и визуализация результатов, получаемых посредством измерительного комплекса, назначением которого является определение фактического режима работы силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ с использованием мгновенных значений токов электрической нагрузки.

#### Описание измерительного комплекса

В состав измерительного комплекса для определения фактического режима работы силовых трансформаторов (далее измерительный комплекс), внешний вид которого представлен на рис. 1, входят:

- ноутбук;
- программное обеспечение для анализа результатов измерений;
- блок преобразования и гальванической развязки;
- зажимы для измерения напряжения, подключаемые к токоведущим частям;
- токоизмерительные клещи (на рисунке не показаны);
- токоизмерительные катушки Роговского;
- датчик измерения температуры окружающего воздуха.

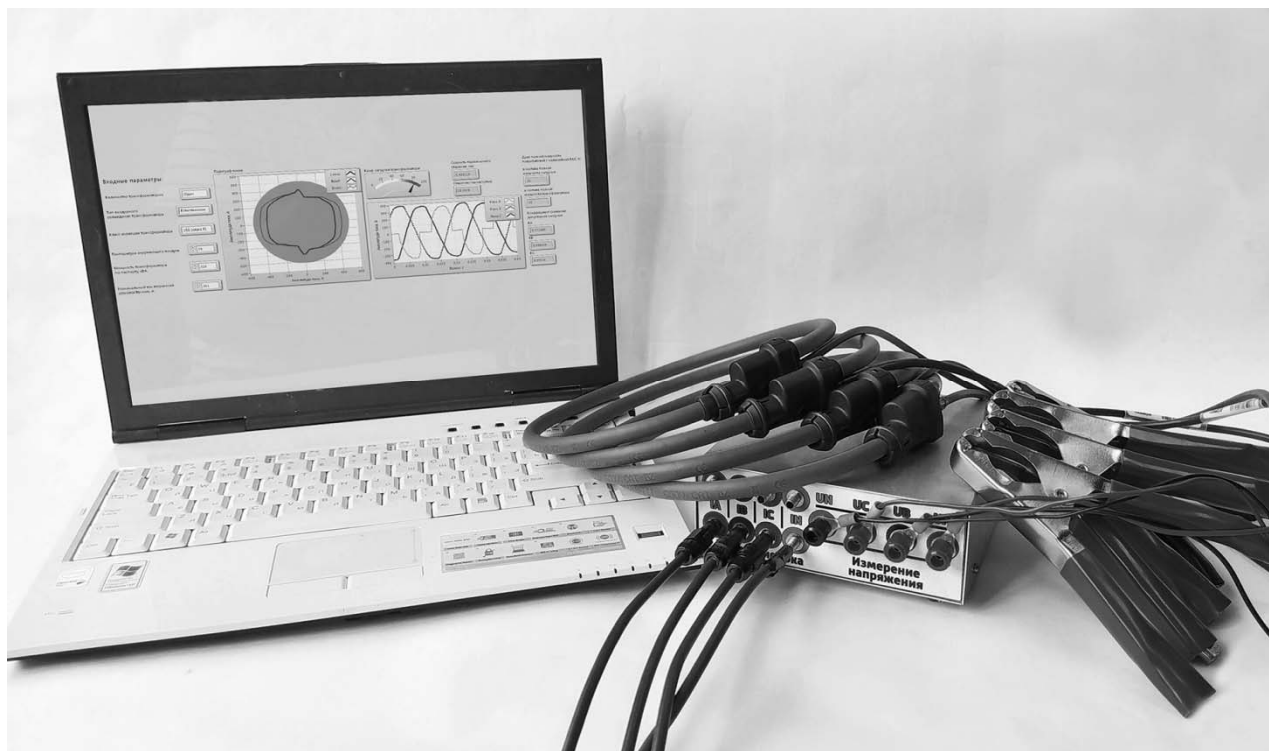


Рис. 1. Измерительный комплекс для определения фактического режима работы силовых трансформаторов

Аппаратная реализация измерительного комплекса позволяет выполнять оценку фактического режима работы силовых трансформаторов

мощностью до 4000 кВА и напряжением 6(10)/20/0,4(0,69) кВ, применяемых в составе трансформаторных подстанций промышленных

предприятий, жилых и общественных зданий, торгово-офисных центров, объектов инженерной инфраструктуры и других.

Для подключения к токоведущим частям (наконечникам кабелей, шинам) с целью измерения напряжения используются специальные зажимы типа «крокодил», позволяющие обеспечить надежный электрический контакт с изолированными токоведущими частями. Для измерения токов при небольших сечениях проводника и шинах круглого сечения в качестве первичных преобразователей могут быть использованы токоизмерительные клещи. Токоизмерительные катушки Роговского используются для измерения токов в плоских шинах и проводниках большого сечения.

Блок преобразования и гальванической развязки (БПГР) имеет в своем составе аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) NI USB-6009 OEM, при помощи которого аналоговые сигналы преобразуются в цифровой код для последующей обработки посредством программного

обеспечения. Частота дискретизации АЦП составляет 6 кГц на канал, разрешение 13 бит. БПГР подключается к трехфазной линии напрямую, максимальное напряжение на входе АЦП может составлять  $\pm 10$  В, поэтому в схеме (рис. 2) применяются развязывающие усилители *DA5, DA6, DA7*, соответственно, для фазы А, В, С. Усилители имеют коэффициент усиления меньше единицы и уменьшают фазное напряжение до необходимого значения, кроме того, обеспечивается гальваническая развязка устройства от электрической сети. Для использования всего диапазона измерения токоизмерительных приборов и для уменьшения возможных помех при измерении небольших значений тока используются операционные усилители *OP1-OP4* с изменяемым коэффициентом усиления. Весь диапазон измерения тока разбит на пять промежуточных значений: 0-3 А, 3-16 А, 16-30 А, 30-160 А, 160-300 А, которые выставляются многопозиционным переключателем *SW1*.

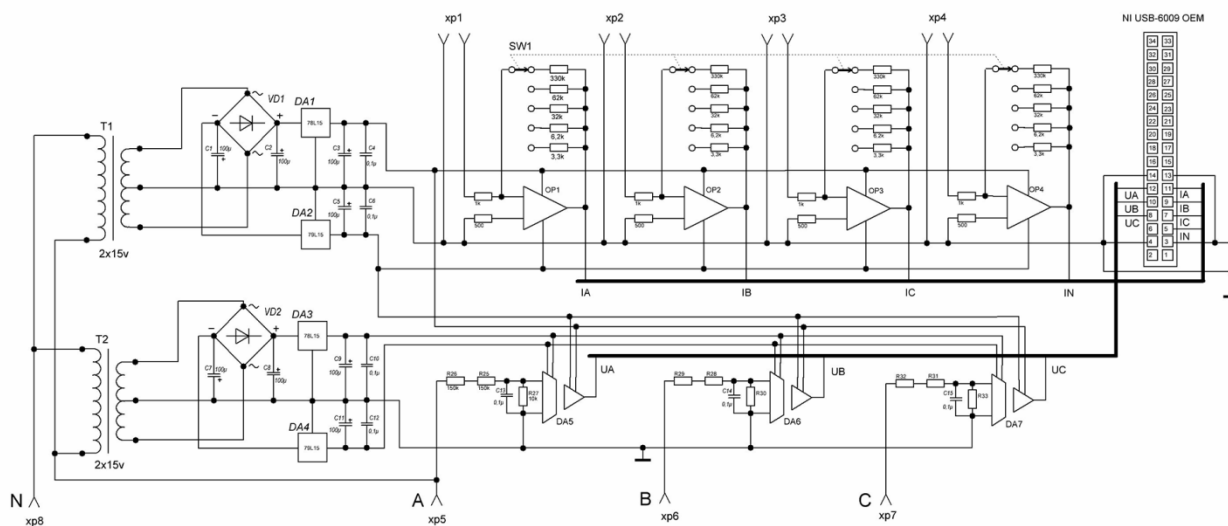


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блока преобразования и гальванической развязки

При эксплуатации силового электрооборудования, и в частности силовых трансформаторов, важную роль играет температура окружающей среды. Поэтому измерительный комплекс имеет в своем составе датчик измерения температуры окружающего воздуха и соответствующий измерительный канал. При выполнении обследования возможно задание температуры вручную для прогнозирования работы трансформатора с текущим типом нагрузки при различной температуре окружающего воздуха.

Программное обеспечение для анализа результатов измерений реализовано в среде гра-

фического программирования NI LabVIEW путем создания виртуального измерительного прибора (ВИП). В состав ВИП входят блок-диаграмма (рис. 3) и лицевая панель (рис. 4). Блок-диаграмма позволяет визуализировать логику работы ВИП и вносить изменения в параметры математических моделей силовых трансформаторов, которые используются для определения режима работы.

Используя лицевую панель (рис. 4), пользователь задает необходимые исходные данные для расчетов и получает результаты в цифровом или графическом виде. Лицевая панель позволя-

ет пользователю вводить параметры, для того чтобы система использовала математическую модель, соответствующую типу обследуемого силового трансформатора:

- тип силового трансформатора и особенности его конструкции (сухой с воздушно-барьерной изоляцией, литой или монолитной изоляцией обмоток; масляный);
- тип охлаждения силового трансформатора (естественное или принудительное воздушное для сухих трансформаторов; с естественной или принудительной циркуляцией масла для масляных трансформаторов);

- класс нагревостойкости изоляции трансформатора (А, Е, В, F, Н, 200, 220) по ГОСТ 8865–93 (МЭК 85-84) «Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация»;
- номинальная мощность силового трансформатора;
- номинальный ток вторичных обмоток силового трансформатора;
- температура окружающего воздуха (для прогнозирования работы трансформатора с текущим типом нагрузки при различной температуре окружающего воздуха).

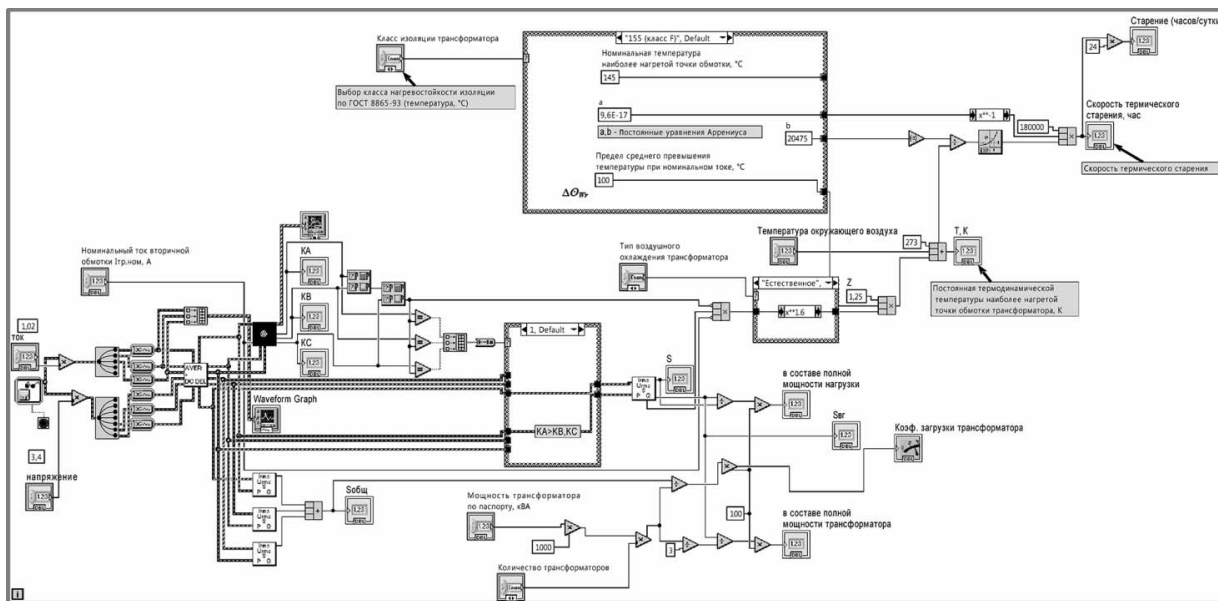


Рис. 3. Блок-диаграмма виртуального измерительного прибора

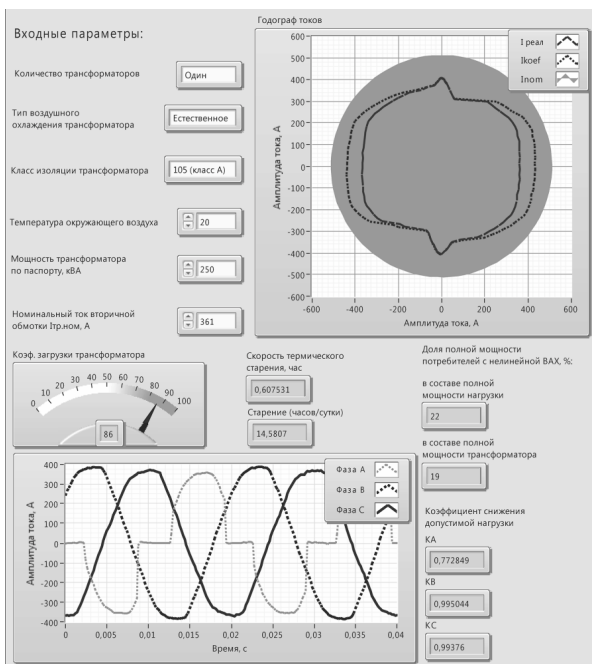


Рис. 4. Лицевая панель виртуального измерительного прибора

На лицевой панели виртуального прибора (рис. 3) отображаются:

- осциллограммы мгновенных значений токов во всех фазах;
- доля полной мощности нелинейной нагрузки в составе полной мощности электрической нагрузки, %:

$$N_{НН} = \frac{S_{НН}}{S_{НАГР}} \cdot 100; \tag{1}$$

- доля полной мощности нелинейной нагрузки в составе полной мощности силового трансформатора, %:

$$N_{НН.ТР} = \frac{S_{НН}}{S_{ТР.НОМ}} \cdot 100; \tag{2}$$

- фактический коэффициент загрузки силового трансформатора с учетом воздействия высших гармоник тока и температуры окружающей среды:

$$K_{з.ф} = \frac{S_{НАГР}}{S_{ТР.НОМ} \cdot K_{СДН.ВГ} \cdot K_{СДН.ТО}} = \frac{S_{НАГР}}{S_{ТР.НОМ} \cdot K_{СДН}}, \quad (3)$$

где значения коэффициентов КСДН.ВГ и КСДН.ТО определяются в соответствии с алгоритмом, который приведен в [8]

– коэффициенты снижения допустимой нагрузки для каждой фазы силового трансформатора:  $K_{СДН.А}$ ,  $K_{СДН.В}$ ,  $K_{СДН.С}$ ;

– трехфазный годограф тока [9], формирующийся из мгновенных значений тока во всех фазах, преобразованных в координаты векторов на комплексной плоскости;

– относительная скорость термического старения изоляции обмоток  $k$ , ч;

– среднее значение выработки срока службы изоляции обмоток за период измерений, ч/день:

$$k_{СУТ} = \sum_{i=1}^{24} k_i. \quad (4)$$

Выработка срока службы трансформатора определяется скоростью термического старения изоляции, которая зависит от температуры наиболее нагретой точки. Для определения скорости термического старения изоляции использовались математические модели: сухих силовых трансформаторов с воздушно-барьерной изоляцией, естественным и принудительным охлаждением (ГОСТ Р 54419–2011 «Трансформаторы силовые. Часть 12. Руководство по нагрузке сухих силовых трансформаторов»); масляных силовых трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией масла (ГОСТ Р 14209–97 «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов»). Указанные мате-

матические модели были дополнены коэффициентом, учитывающим снижение допустимой нагрузки силового трансформатора от высших гармоник тока.

Температура наиболее нагретой точки для каждой из обмоток трехфазного силового трансформатора отличается и зависит от нагрузки в соответствующей фазе. Поэтому для определения фактического коэффициента загрузки, скорости термического старения и выработки срока службы трансформатора ВИП использует наименьшее из полученных значений  $K_{СДН}$ .

### Пример работы измерительного комплекса

Пример визуализации режима работы сухого силового трансформатора с воздушно-барьерной изоляцией и естественным охлаждением приведен на рис. 5. На лицевой панели ВИП визуализация осуществляется путем наложения на один график информации о трех годографах:

– годограф, нарисованный пунктирными линиями, показывает характер потребления тока подключенной в данный момент нагрузкой;

– годограф, нарисованный точками, показывает приведенную загрузку трансформатора, то есть  $tu$ , которая формируется исходя из количества подключенных электроприемников с нелинейным характером потребления тока;

– годограф, изображенный сплошной серой областью, формируется номинальным значением синусоидального тока силового трансформатора и показывает границу, в рамках которой трансформатор работает в номинальном режиме по току.

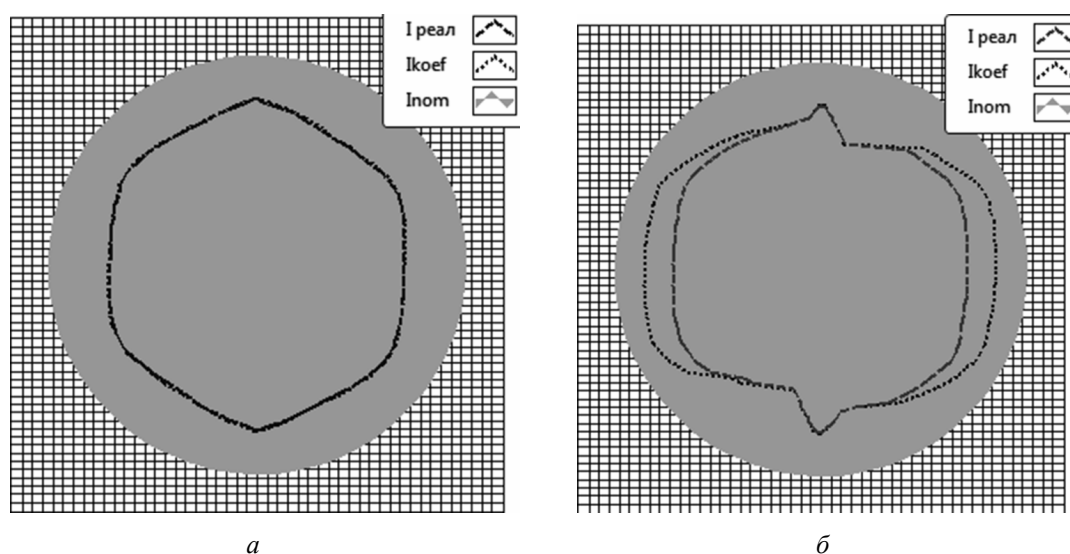


Рис. 5. Составной годограф на лицевой панели виртуального прибора для сухого силового трансформатора с воздушно-барьерной изоляцией и естественным охлаждением: а – при линейной нагрузке в реальной сети с несинусоидальным напряжением, б – при доле полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{НН.ТР} = 19\%$

Чем больше форма годографа тока отличается от окружности, тем выше значение коэффициента несинусоидальности тока. При наличии в электрической сети только линейной нагрузки годографы, определяющие нагрузку, не отличаются друг от друга (рис. 5, а). Как видно из рис. 5, б, чем больше нелинейных потребителей подключено к сети ( $N_{\text{нн.тр}} = 19\%$ ), тем сильнее отличие приведенного годографа (линия из точек) от годографа, образованного реальными токами нагрузки (пунктирная линия), поскольку увеличение высших гармоник вызывает дополнительные потери в элементах трансформатора [10] и фактический коэффициент загрузки отли-

чается от определяемого классическим способом, по выражению:

$$K_3 = \frac{S_{\text{НАГР}}}{S_{\text{ТР.НОМ}}} \quad (4)$$

Если годограф фактического тока (линия из точек) выходит за рамки номинального режима работы (серая окружность), то трансформатор работает в режиме перегрузки и скорость термического старения изоляции обмоток превышает номинальное значение. Следовательно, наблюдается ускоренный износ изоляции обмоток и снижение срока службы силового трансформатора.

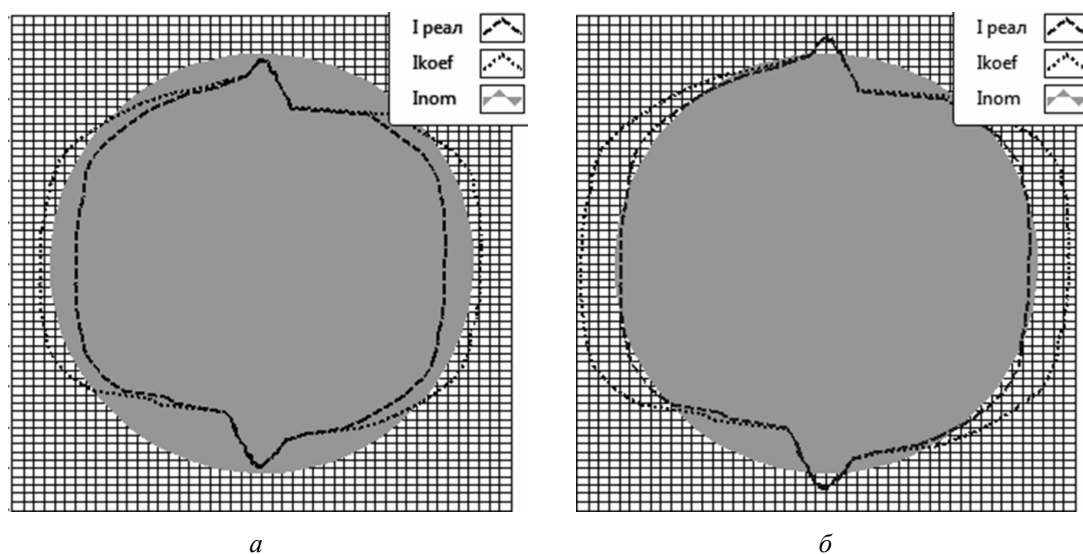


Рис. 6. Пример составного годографа, показывающий перегрузку трансформатора по вине нелинейных электроприемников (а) и общую перегрузку трансформатора по мощности (б)

Если наблюдается перегрузка силового трансформатора только по фактическому годографу (рис. 6, а), следует либо уменьшить количество нелинейных потребителей, либо сократить их влияние на сеть путем использования фильтров высших гармоник или устройств коррекции коэффициента мощности. Если оба годографа, определяющих нагрузку трансформатора, выходят за границы серой зоны, определяющей номинальную загрузку трансформатора (рис. 6, б), следует не только провести все мероприятия, указанные выше, но и отключить часть электрической нагрузки либо перераспределить электрическую нагрузку по менее нагруженным фазам.

Для трансформаторов, работающих в режиме «горячего резерва», существует возможность оценки фактического режима работы, при переводе нагрузки на один силовой трансформатор (при возникновении неисправности или плановых профилактических работах).

Вышеописанная технология определения режима работы силовых трансформаторов имеет перспективу интеграции в системы непрерывного мониторинга, реализуемые с использованием микропроцессорных терминалов и аппаратов защиты, которые являются основой для создания «умных электрических сетей» [11].

#### Выводы

1. Разработан измерительный комплекс, который позволяет определять фактический режим работы силовых трансформаторов и параметры, характеризующие ресурс работы силовых трансформаторов с учетом воздействия несинусоидальных токов нагрузки и температуры окружающей среды.

2. Результаты определения фактического режима работы силовых трансформаторов визуализированы посредством трехфазных годографов тока, что обеспечивает наглядность отображения полученной информации.

3. Интеграция разработанного алгоритма с современными системами непрерывного мониторинга электрических сетей позволит автоматизировать процесс прогнозирования ресурса силовых трансформаторов.

#### Библиографические ссылки

1. Канюгин О. И., Макарова Н. Л. Стратегия обслуживания силовых трансформаторов в сельских электрических сетях 10кВ по результатам диагностирования // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 58–67.

2. Хисматуллин А. С., Вахитов А. Х., Феоктистов А. А. Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 4-2. С. 271–274.

3. К вопросу о разработке мер по снижению аварийности трансформаторных подстанций на основе технологии цифровых двойников / К. В. Семенова, А. И. Тихонов, И. В. Подобный, А. А. Каржевин // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 3 (14). С. 9–18.

4. Костюков А. В., Лила В. Б. Экспертная система диагностики силовых трансформаторов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1 (24). С. 22–27.

5. Костюков А. В., Лила В. Б. Нейросетевая система прогнозирования остаточного ресурса // Вестник РСТУ. 2013. № 3. С. 137–141.

6. Васильева О. В., Лавринович А. В. Цифровая обработка осциллограмм по результатам диагностики силового трансформатора в Lab VIEW // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 97–104.

7. Поляков М. А., Василевский В. В. Прогнозирование износа изоляции обмоток силового трансформатора // Техническая электродинамика. 2014. № 5. С. 65–67.

8. Барсуков В. К., Новоселов М. Л. Способы моделирования работы трехфазной сети с различными типами нагрузок // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1 (28). С. 78–85.

9. Фокеев А. Е., Атрахманов А. А., Даутов Р. Р. Выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ с учетом влияния нелинейной нагрузки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 65–74. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74.

10. Янченко С. А., Цырук С. А., Куликов А. И. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока // Промышленная энергетика. 2017. № 7. С. 44–53. ISSN: 0033-1155.

11. Элементы и устройства управления и контроля интеллектуальных электрических сетей электроснабжения / И. Х. Сиддиков, М. Т. Махсудов, И. М. Хонтуряев, М. А. Анарбаев // Инженерно-

строительный вестник Прикаспия. 2018. № 2 (24). С. 36–42.

#### References

1. Kanyugin O.I., Makarova N.L. [Maintenance strategy of power transformers in rural electric networks of 10kV according to results of diagnostics]. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*. 2016, no.3, pp. 58-67. ISSN: 1810-1909 (in Russ.).

2. Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A. [Monitoring and repair of industrial power transformers technical condition]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016, no.4-2, pp. 271-274. ISSN: 1812-7320 (in Russ.).

3. Semenova K.V., Tikhonov A.I., Podobnyy A.V., Karzhevina A.A. [To the question of the development of measures to reduce the emergency of transformer substation based on technology digital double]. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'*. 2019, no. 3, pp. 9-18 (in Russ.).

4. Kostukov A.V., Lila V.B. [Expert system of electric transformers's diagnostics]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2013, no. 1, pp. 22-27. eISSN: 2073-8633 (in Russ.).

5. Kostukov A.V., Lila V. B. [Neural network prediction of the residual life of power transformers in traction substations of JVC "Russian Railways"]. *Vestnik RSTU*. 2013, no. 3, pp. 137-141. ISSN: 0201-727X (in Russ.).

6. Vasileva O.V., Lavrinovich A.V. [Digital processing of oscillograms by result of diagnostics of the power transformer in the environment of lab view]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no. 6, pp. 97-104. eISSN: 2070-7428 (in Russ.).

7. Polyakov M.A., Vasilevskiy V.V. [Prediction of wearing out of power transformers winding insulation]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 2014, no. 5, pp. 65-67. ISSN: 1607-7970 eISSN: 2218-1903 (in Russ.).

8. Barsukov V.K., Novoselov M.L. [Methods for modeling of operation of a three-phase circuit with various types of loads]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2016, no.1(28), pp. 78-85. ISSN: 1813-7911. eISSN: 2410-9304 (in Russ.).

9. Fokeev A.E., Atrahmanov A.A., Dautov R.R. [Selecting the Power Transformers Rated for 10(6)/0.4 kv Substations Taking into Account the Influence of Nonlinear Load]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 65-74 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74.

10. Yanchenko S.A., Cyruk S.A., Kulikov A.I. [Methods reducing the load of transformers in the networks with a high level of working current unsinusoidality]. *Promenergetika*, 2017, no. 7, pp. 44-53. ISSN: 0033-1155 (in Russ.).

11. Siddikov I.H., Mahsudov M.T., Honturaev I.M., Anarbaev M.A. [Elements and devices for control and monitoring of intelligent electrical power supply networks]. *Inzhenerno-stroitel'nyj Vestnik Prikaspiya*. 2018, no. 2, pp. 36-42. ISSN: 2312-3702 (in Russ.).

\* \* \*

**Measuring Complex for Determining the Operating Conditions of Power Transformers***A.E. Fokeev*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia*M.L. Novoselov*, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*It is shown that the survey of existing electrical facilities (transformer substations) should be carried out with the use of tools that allow for determining the actual mode of operation of power electrical equipment. It is proposed to use instantaneous current values and harmonic analysis to determine the actual operating mode of power transformers and assess the development of the winding insulation resource.*

*The paper presents the description of the principle of operation and visualization of results obtained by means of a measuring complex, the purpose of which is to determine the actual operating mode of power transformers with a voltage of 10(6)/0.4 kV.*

*The determination of the actual operating mode of power transformers and parameters characterizing the service life of power transformers is carried out taking into account the impact of non-sinusoidal load currents and the ambient temperature. Mathematical models of dry power transformers with the air-barrier insulation with natural and forced cooling and oil-immersed power transformers with natural and forced oil circulation are used. The models take into account the influence of the higher harmonic components of the load current and the actual value of the ambient temperature. The results of determining the actual operating mode of power transformers are visualized by means of three-phase current hodographs providing a clear display of the information received.*

**Keywords:** power transformers, rate of insulation thermal aging, reduced service life, higher harmonic components, three phase hodograph.

Получено: 28.07.2020