

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ И СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Аннотация.** Одной из основных составных частей современных электрических систем являются силовые трансформаторы (СТ), суммарная мощность которых из-за многократной трансформации электрической энергии в 5–6 раз превышает генераторную мощность. Несмотря на то, что проектирование и производство силового трансформатора проводилось на высоком уровне, в эксплуатации они требуют выполнения комплекса профилактических мероприятий: хроматографических анализов масла, электрических испытаний, текущих и капитальных ремонтов и др. Из-за того, что не везде эксплуатация силового трансформатора проводилась и проводится надлежащим образом, а также из-за физического и морального старения оборудования, вероятность аварий силовых трансформаторов сегодня оказывается достаточно высокой, что нежелательно из-за следующих соображений: потери объекта, как материальной ценности или потребности больших инвестиций на восстановление оборудования; вероятности «эффекта домино», когда аварийный процесс затрагивает соседнее оборудование и окружающую среду; перерывом в электроснабжении потребителей. Последнее обстоятельство может сопровождаться значительным ущербом, что в итоге может превзойти экономические потери от первых двух причин. Проблема усугубляется тем, что в современных электрических сетях продолжается и будет продолжаться эксплуатация оборудования исчерпавшего или давно исчерпавшего свой нормативный ресурс. Таким образом, можно утверждать, что любые исследования и разработки, направленные на повышение надежности эксплуатации стареющего трансформаторного оборудования, являются актуальными. Проведен анализ существующих подходов и систем диагностирования масляных трансформаторов.

**Ключевые слова:** трансформатор, диагностика, техническое состояние, дефект, контроль, надежность, срок службы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-129-135

На сегодняшний день нормативными документами установлены три уровня системы контроля трансформаторного оборудования:

- уровень текущего контроля состояния, выполняемый службами предприятий электросетей и электростанций, который включает контроль состояния масла и электрических характеристик в эксплуатации в соответствии с [2];
- уровень более тщательного контроля состояния, выполняемый в основном специализированными организациями, который включает применение

более сложных методов, таких, как контроль частичных разрядов, контроль деформации обмоток с помощью метода низковольтных импульсов, определение степени полимеризации твердой изоляции, измерение содержания фурановых соединений и ионола в масле трансформаторов, контроль состояния масла по оптическим показателям, по наличию коллоидов (для вводов), по наличию продуктов старения масла методом ИК-спектроскопии. Производится также контроль изоляции вводов ВН под напряжением, дистанционный контроль утечек

масла в систему охлаждающей воды, периодический тепловизионный контроль нагревов деталей и узлов трансформатора;

- уровень контроля состояния, лежащего в основе оценки возможности дальнейшей эксплуатации трансформаторного оборудования, отработавшего установленный стандартами минимальный срок службы. Такой контроль должен проводиться при выводе в ремонт по специальной программе, составленной индивидуально для данного трансформатора, при участии ремонтных организаций и заводов-изготовителей.

Важная роль в организации эффективной системы контроля и выполнении мероприятий по совершенствованию ухода за трансформаторами принадлежит ОАО «ВНИИЭ» и БП «Электросеть-сервис», определенных в РАО «ЕЭС России» головными организациями по проблемам оценки работоспособности трансформаторов [2].

Так, по опыту НПО «Техносервис-Электро», которым было обследовано большое количество трансформаторов 6,3–1000 МВ А, 90% которых имело наработку более 25 лет, было установлено, что срочного вывода из работы требуют не более 2% трансформаторов, капитальный ремонт нужен для 20–25% давно эксплуатирующихся трансформаторов, 40–50% обследованных трансформаторов могут работать без ограничений. Нарработку в 45–50 лет следует признать критической, дальнейшая эксплуатация связана с неоправданным риском [3].

Важным условием эффективного ухода за крупным парком трансформаторов является наличие необходимого информационного обеспечения результатов проведенных обследований состояния трансформаторов.

Результаты обследования и слежения за изменением состояния каждого конкретного трансформатора должны фик-

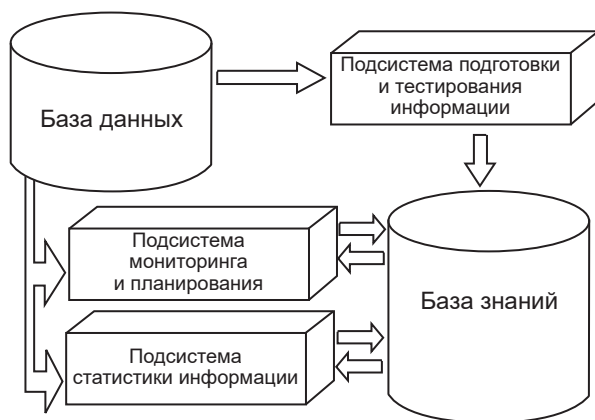
сироваться в базе данных, входящей в информационную систему. В задачи информационной системы входят сбор и обработка результатов испытаний и измерений, проводимых согласно нормам испытаний и другим директивным документам, результатов технического обслуживания и ремонтов, анализа отказов и других аспектов эксплуатации трансформаторного оборудования, необходимых для оценки технического состояния.

По мнению специалистов ВНИИЭ [2], база данных такой системы должна содержать следующую информацию:

- перечень объектов, на которых установлено оборудование;
- паспортные данные оборудования;
- особенности конструкции (тип и особенности устройств РПН, конструкция и размещение обмоток, конструкция магнитопровода и размещение шунтов, конструкция прессовки обмоток, количество адсорберов и их размещение, конструкция системы охлаждения и данные по маслососам, способ защиты масла от окисления и т.д.);
- характеристики режимов работы трансформаторного оборудования;
- описания аварий и отказов в процессе эксплуатации; причины и объемы ремонтов, включая данные о замене и модернизации отдельных элементов;
- работы по обслуживанию трансформаторного масла и по его замене;
- результаты испытаний и измерений, включая результаты комплексных обследований с оценкой технического состояния и рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

База данных должна пополняться оперативно по мере поступления информации. В информационной системе должны быть блоки выявления дефектов, оценки технического состояния, принятия решения и выдачи рекомендаций.

В качестве начального шага создания информационной системы в лабо-



Структура ЭДИС «Альбатрос»

Structure of Albatros Electrical Diagnostics System

ратории трансформаторов ВНИИЭ была создана база данных, в которой хранится информация о паспортных данных трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов напряжением 330 кВ и выше (2576 единиц оборудования).

Следующим шагом в этом направлении является создание экспертно-диагностической системы (ЭДИС) «Альбатрос» [2].

Эта система имеет следующие особенности:

1. В базу знаний (БЗ) включены нормативные документы.

2. Для оборудования, взятого на контроль по результатам проведенных измерений, назначаются дополнительные измерения для:

- подтверждения диагноза;
- уточнения диагноза;
- локализации дефекта;
- определения степени его опасности.

3. Использование для диагностики оборудования нескольких видов измерений повышает достоверность диагнозов.

4. Отслеживается динамика изменений параметров.

5. Если тестовая диагностика показывает отклонения от режимов нормальной эксплуатации, то подключается база знаний.

6. База знаний выдает:

- оценку технического состояния оборудования;
- рекомендации по дальнейшей его эксплуатации или своевременному отключению.

ЭДИС «Альбатрос», структура которой представлена на рисунке, обеспечивает следующие возможности:

- тестовую оперативную оценку состояния оборудования на основе диагностических моделей, включающую:
  - расчет модели и вывод результатов в виде таблиц;
  - визуализация моделей в графическом виде с привязкой к датам измерения.
- многоаспектную диагностику по разным видам испытаний и измерений:
  - определение характера, места и степени опасности дефекта;
  - рекомендации персоналу по дальнейшим эксплуатационным мероприятиям, объему испытаний и измерений, вычисления следующей даты замера;
  - ранняя диагностика трансформаторов и вводов по диаграммам состава газов, треугольнику Дюваля.

Данные (испытаний) сравниваются со значениями, нормирующими переход оборудования из одного класса технического состояния в другой ('нормальная

эксплуатация', 'зона риска', 'опасное состояние'). Проводится тестовая диагностика содержания модели на «нормальную эксплуатацию». Если есть отклонения от режимов нормальной эксплуатации, то с помощью нескольких методов интерпретации диагностической модели проводится поэтапный анализ ситуации.

В результате база знаний выдает оценку технического состояния оборудования и рекомендации по дальнейшей его эксплуатации или своевременному отключению. Оценка технического состояния оборудования проводится с помощью диагностических моделей, представляющих алгоритмы сравнения измеренных и рассчитанных (подсистемой подготовки информации) величин с уставками из библиотеки граничных значений. Пользователь может просмотреть результат расчет модели в числовом и графическом виде. Наиболее известные компьютерные экспертно-диагностические системы — это «Диана», «ДиаХром», «Полихром», «Элхром».

«Диана» — комплекс программ для ведения и анализа информации по электрооборудованию.

«ДиаХром» — обеспечивает прием и обработку хроматограмм, хранение результатов хроматографических анализов растворенных в трансформаторном масле газов в базе данных; определение и хранение значений влагосодержания масла [8].

«Элхром» — осуществляет оперативный контроль графика отбора проб. Выдает рекомендации по эксплуатации. Проводит диагностику всего маслонеполненного оборудования. Дает пояснение принятых решений.

Наиболее полное заключение дает комплексное обследование состояния трансформатора.

Комплексное обследование дает:

- высокую эффективность раннего выявления дефектов;

- обоснование переноса сроков капитального ремонта;

- исключение ложной отбраковки, возможное при оценке по одному параметру;

- возможность подтверждения работоспособности или введения ограничений на режим;

- выдачу рекомендаций о сроках и объемах ремонта или замены оборудования, а также рекомендаций по повышению безопасности и безаварийности эксплуатации трансформатора.

В основу комплексной методики определения состояния силовых трансформаторов, положены принципы моделей вероятных дефектов. С помощью этой методики осуществляется переход от превентивной профилактики к системам обслуживания трансформаторов по фактическому состоянию и по обоснованной надежности.

К перспективным видам испытаний на работающем трансформаторе относятся:

- расширенный анализ масла (кроме традиционных газохроматографических влаги, фуранов и механических примесей — определение карбоксилов в ИК-спектре, числа омыления, мутности, потенциального осадка, коэффициента поверхностного натяжения, коэффициента полярности, цвета).

- опыт прогрева трансформатора с отбором проб масла — оценка увлажнения твердой изоляции по выделению влаги в масло при повышении его температуры;

- определение параметров частичных разрядов — кажущегося заряда, частоты повторения и энергии;

- анализ виброакустического спектра (выявление дефектов крепления на фундаменте, аномальных вибраций, резонансов износа маслонасосов). Исследуется возможность определения качества прессовки по вибрации на поверхности бака;

- обследование с помощью тепловизора (определение нагрева контактов, разъема, контуров тока в баке, исправности охладителей и фильтров, перегревов устройства, нагревов вводов, коммутационной аппаратуры).

Методика предполагает постепенное внедрение различных видов непрерывного контроля:

- газов, растворенных в масле (с экспертной системой интерпретации результатов анализа);
- относительной влажности масла (с экспертной системой);
- частичных разрядов (акустическими и электрическими датчиками, с определением опасности дефекта);
- диэлектрических характеристик вводов ВН (амплитудно-фазового спектра тока небаланса в трехфазной системе);
- виброакустических спектров (определение распрессовки обмоток и магнитопровода);
- характеристик устройства РПН (потребление привода, момент сопротивления на валу, акустические параметры).

Комплекс обследования НПО «Техносервис-Электро» рассчитан в первую очередь на оценку работоспособности трансформаторов с большим сроком службы. Кроме традиционных методов испытаний, проводимых в соответствии с [1], применяются дополнительные нетрадиционные методы контроля для выявления места и степени развития дефекта, повышения точности постановки диагноза.

Комплекс обследования, используемый БП «Электросетьсервис» и лабораторией трансформаторов ОАО «ВНИИЭ», включает примерно те же операции, что комплекс обследования НПО «Техносервис-Электро», развивается в соответствии с трехуровневой программой обследований [2, 6].

Специалистами ПЭИПК (С.-Петербург) сформулирован минимально необходи-

мый объем комплекса обследования крупных силовых трансформаторов.

Этот комплекс содержит контроль физико-химических и электрических параметров масла, определение давления масла, определение влажности твердой изоляции (по заложенным в трансформатор образцам), электрических параметров изоляции при рабочем напряжении, обследование с помощью тепловизора [8].

В качестве примера комплекса обследования, принятого за рубежом можно привести программу оценки работоспособности сетевых трансформаторов с большим сроком службы в энергокомпании National Grid Co pic (Великобритания) [6]. Компания обслуживает 280 подстанций, на которых работают 700 трансформаторов мощностью 100—1000 МВ-А.

В объем комплексных испытаний входит подробный анализ масла с определением содержания газов (ГХА), влаги, фуранов, фенолов и крезолов, кислотного числа и других параметров, проверка газового реле, контроль разрядов на радиочастотах, обследование с помощью тепловизора. Периодически проводится измерение  $\tan\delta$  вводов и осмотр устройства РПН.

Проведенный анализ показывает, что в каждом подходе стремятся использовать весьма широкий спектр сходных видов и методик испытаний силовых трансформаторов. При этом просматривается некоторый механистический прием, когда новый вид испытания применяется без анализа его экономической эффективности. Для того, чтобы это сделать необходимо:


- четко представлять физику развития дефектов в силовом трансформаторе;
- каждому виду дефекта поставить в соответствие систему диагностических признаков с их анализом;
- организовать сбор статистики по результативности использования конк-

ретного вида испытаний на оборудовании, реально имеющем дефект.

Несмотря на обилие подходов и рекомендаций, предлагаемых как отечествен-

ными, так и зарубежными специалистами, в проблеме эффективного обслуживания трансформаторного оборудования еще много нерешенных вопросов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.А. Когана, Л.Г. Мамиконянца, 6-е изд., с изм. и доп. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 256 с.
2. Кустов С.С., Богомолов В.С. Информационная система оценки технического состояния трансформаторов РАО «ЕЭС России» / Вестник ВНИИЭ. — М., 1998. — С. 49–51.
3. Севостьянов П.Р. Анализ повреждаемости трансформаторов мощностью 16 и 25 МВ А класса напряжения 110 кВ // Электро. — 2004. — № 5. — С. 25–27.
4. Давиденко И.В. Информационные технологии в организации диагностики силового электрооборудования // Электрика. — 2004. — № 7. — С. 21–25.
5. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 216 с.
6. Богомолов В.С., Касаткина Т.Е., Кустов С.С. и др. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / Вестник ВНИИЭ. — М., 1997. — С. 25–32.
7. Монастырский А.Е., Таджикибаев А.И. Методические основы комплексной оценки состояния трансформаторов. — Екатеринбург. 1999.
8. Китаев Е.А. Компьютерная система оценки состояния маслонаполненного электрооборудования «ДиаХром» // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. — 1997. — Вып. 5. — С. 121.
9. Кунцевич М.В. Диагностика трансформаторов // Наука и техника Казахстана. — 2010. — № 4. — С. 50–54.
10. Дробышевский А.А. Электродинамическая стойкость трансформаторов // Новости электротехники. — 2010. — № 5.
11. Инструкция по определению характера внутренних повреждений трансформаторов по анализу газа и газового реле РД 34.46.502. — Л.: Энергия, 2014. — 441 с.
12. Инструкция по эксплуатации силовых трансформаторов. — Л.: Энергия, 2012. — 429 с.
13. Тихомиров П.М. Расчет силовых трансформаторов. — М.: Книга по требованию, 2012. — 544 с.
14. Sung Chul Cha, Ali Erdemir Editors. Coating Technology for Vehicle Applications / Sung Chul Cha Materials Development Center R&D. Ali Erdemir Argonne National Laboratory Energy Systems Division Argonne, IL, USA. Division, Hyundai Motor Group Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea. Springer International Publishing Switzerland, 2015, 240 p.
15. SAE LA1012, A Guide to the Reliability — Centered Maintenance Standard Up to date of August 19, 2010.
16. Schoen R. R., Lin B. K., Habetter F. G., Shlog H. J., Farag S. An Unsupervised On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring // IEEE-IAS Transactions, November/December, Vol. 31, No 6, 1995, pp. 1280–1286.
17. Decision of problem of repairing and technical servicing of quarry equipment // Australian Mining. 1995, 87, no 4, pp. 34, 36. 

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Косарева-Володько Ольга Владимировна<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 2, pp. 129–135.

## Review of the current approaches and systems of oil transformer diagnostics

Kosareva-Volod'ko O.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: kosareva-volodko@rambler.ru, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

**Abstract.** One of the components of the modern electric systems are supply transformers total capacity of which exceeds generator capacity by 5–6 times owing to multiple transformation of electric energy. Despite high-level design and manufacture, supply transformers need preventive maintenance while operated: oil chromatography, electric testing, running repair and overhauling, etc. Due to inappropriate operation as well as physical and moral obsolescence, supply transformers feature high accident risk, which is undesirable because of the loss of the worth equipment and high reconditioning investment; probability of domino effect when the process of failure grasps neighbor machines and environment; break in consumer supply. The latter can bring appreciable damage, which eventually will exceed the economic loss due to the former two causes. The problem gets even worse as the modern mains run and will run equipment with the nearly expired or long-ago expired standard life. Thus, it is possible to state that any R&D aimed to improve operational integrity of aging transformer equipment is urgent. This article reviews the current approaches and systems available for the diagnostics of oil transformers.

**Key words:** transformer, diagnostics, technical state, defect, control, reliability, service life.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-129-135

## REFERENCES

1. *Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya*. Pod red. B. A. Alekseeva, F. L. Kogana, L. G. Mamikon-yantsa, 6-e izd. [Scope and rates of electric equipment testing. Alekseev B. A., Kogan F. L., Mamikon-yants L. G. (Eds.), 6th edition], Moscow, Izd-vo NTS ENAS, 2002, 256 p.
2. Kustov S. S., Bogomolov B. C. *Informatsionnaya sistema otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorov RAO «EES Rossii»* [Information system for estimation of technical state of transformers at RAO UES], Vestnik VNIIE, Moscow, 1998, pp. 49–51. [In Russ].
3. Sevost'yanov P. R. Analiz povrezhdaemosti transformatorov moshchnost'yu 16 i 25 MV A klassa napryazheniya 110 kV [Vulnerability analysis of transformers with a capacity of 16 and 25 MW in class A and voltage of 110 kV], *Elektro*. 2004, no 5, pp. 25–27. [In Russ].
4. Davidenko I. V. Informatsionnye tekhnologii v organizatsii diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya [Information technologies in power equipment diagnostics management], *Elektrika*. 2004, no 7, pp. 21–25. [In Russ].
5. Alekseev B. A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* [Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers], Moscow, Izd-vo NTS ENAS, 2002, 216 p.
6. Bogomolov B. C., Kasatkina T. E., Kustov S. S. *Analiz prichin povrezhdeniy i rezul'taty obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya transformatornogo oborudovaniya* [Trouble source analysis and condition survey data for transformer equipment], Vestnik VNIIE, Moscow, 1997, pp. 25–32. [In Russ].
7. Monastyrskiy A. E., Tadzhibayev A. I. *Metodicheskie osnovy kompleksnoy otsenki sostoyaniya transformatorov* [Methodical framework for integrated assessment of transformer conditions], Ekaterinburg, 1999.
8. Kitaev E. A. *Komp'yuternaya sistema otsenki sostoyaniya maslonapolnennogo elektrooborudovaniya «DiaKHrom»* [Computer-aided system for estimating condition of oil-filled electric equipment DiaKHrom], *Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya*. 1997, issue 5, pp. 121. [In Russ].
9. Kuntsevich M. V. *Diagnostika transformatorov* [Transformer diagnostics], *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2010, no 4, pp. 50–54. [In Russ].
10. Drobysheskiy A. A. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov* [Electrodynamic resistance of transformers], *Novosti elektrotekhniki*. 2010, no 5. [In Russ].
11. *Instruktsiya po opredeleniyu kharaktera vnutrennikh povrezhdeniy transformatorov po analizu gaza i gazovogo rele RD 34.46.502* [Guidelines to determine nature of internal damages of transformers by the analysis of gas and gas relay RD 34.46.502], Leningrad, Energiya, 2014, 441 p.
12. *Instruktsiya po ekspluatatsii silovykh transformatorov* [Power transformers: operating manual], Leningrad, Energiya, 2012, 429 p.
13. Tikhomirov P. M. *Raschet silovykh transformatorov* [Power transformer design], Moscow, Kniga po trebovaniyu, 2012, 544 p.
14. Sung Chul Cha, Ali Erdemir Editors. *Coating Technology for Vehicle Applications*. Sung Chul Cha Materials Development Center R&D. Ali Erdemir Argonne National Laboratory Energy Systems Division Argonne, IL, USA. Division, Hyundai Motor Group Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea. Springer International Publishing Switzerland, 2015, 240 p.
15. SAE LA1012, *A Guide to the Reliability – Centered Maintenance Standard Up to date of August 19*, 2010.
16. Schoen R. R., Lin B. K., Habetter F. G., Shlog H. J., Farag S. An Unsupervised On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE-IAS Transactions*, November/December, Vol. 31, No 6, 1995, pp. 1280–1286.
17. Decision of problem of repairing and technical servicing of quarry equipment. *Australian Mining*. 1995, 87, no 4, pp. 34, 36.