

Непрерывный контроль и оценка остаточного ресурса электротехнического оборудования на классы напряжений 110 кВ и выше

*Сахно А.А. – заместитель директора по развитию,
Конограй С.П. – главный инженер.
ООО «Энергоавтоматизация», г. Москва.*

В докладе представлены предложения по модернизации существующей системы эксплуатационной диагностики на основе внедрения систем автоматизированного непрерывного контроля состояния высоковольтного электротехнического оборудования и прогноза его остаточного ресурса. Описан предлагаемый подход для оценки ресурса оборудования.

Техническое состояние и наработка парка высоковольтного электротехнического оборудования, а также современные тенденции к модернизации и интеллектуализации электроэнергетики ставят ряд новых задач для эксплуатационной диагностики: снижение затрат, при повышении технической стойкости энергосистемы; оценка текущего состояния и прогноз остаточного ресурса оборудования, для планирования распределения финансовых активов, в условиях старения эксплуатируемого парка оборудования; автоматизация диагностики для создания «необслуживаемых» подстанций (ПС) и интеллектуальных электроэнергетических систем [1]. В условиях современного развития электроэнергетической отрасли России, все больше внимания уделяется автоматизированному контролю и диагностике высоковольтного электротехнического оборудования. Первоочередной задачей систем непрерывного контроля (СНК) являлось предупреждение аварий оборудования, однако, с развитием этой области, системам непрерывного контроля должно предъявляться требование не только предупредить аварию, но и определить остаточный ресурс оборудования, для возможности планирования его замены и ремонта.

Компания ООО «Энергоавтоматизация» имеет богатый опыт разработки и внедрения систем непрерывного контроля и диагностики высоковольтного оборудования на классы напряжения 110 – 750 кВ под рабочим напряжением.

За период с 2001 по 2012 гг. системами ООО «Энергоавтоматизация» были оборудованы более 120 единиц силового трансформаторного оборудования. Системы **SAFE-T™** установлены на важных энергетических объектах России, Украины и Казахстана. В числе которых подстанции, обеспечивающие электроснабжение г. Москвы (4 подстанции 500кВ проекта «Московское кольцо» – 35 единиц оборудования), г. С.-Петербурга (ПС 750кВ «Ленинградская»), металлургического комбината «Миттал Стил Темиртау», Павлодарский электролизный завод (Казахстан). Осуществляется поэтапное комплексное оснащение системами всего трансформаторного оборудования Электростанции АО «ЕЭК» (Ермаковская ГРЭС). На данный момент уже введены в эксплуатацию 8 из 15 систем непрерывного контроля. Системы **SAFE-T™** установлены на 13 трансформаторах и автотрансформаторах крупнейшей в Европе ПС 500кВ «Очаково» (г. Москва).

На данный момент разработаны и внедрены СНК следующих типов оборудования: трансформаторов (автотрансформаторов), реакторов, вводов, трансформаторов тока, ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН). Разработан интеллектуальный моторный привод устройства РПН (рис. 1) на базе безредукторного вентильного двигателя, предоставляющий широкие возможности для управления, диагностики и оценки остаточного ресурса устройства РПН. В настоящее время опытный образец привода находится на завершающем этапе ресурсных испытаний.



Рис.1 – Привод ПЭА-1

Основные достоинства нового привода:

- вал вентильного двигателя непосредственно (без редуктора) соединен с валом РПН;
- из конструкции моторного привода исключено около 90% всех механических и электромеханических узлов;
- высокая точность позиционирования вала РПН (до 0,0002 рад);
- система отслеживания позиции вала;
- возможность ограничения максимального момента;
- выполнение всех требований ГОСТ 24126-97 и ГОСТ 8008-75;
- встроенный автоматический регулятор напряжения;
- встроенная система самодиагностики привода;
- встроенная система мониторинга устройства РПН;
- простота групповой работы;
- быстрая перенастройка привода под широкий диапазон типов переключающих устройств.

На данный момент усилия наших специалистов также направлены на развитие систем непрерывного контроля в части совершенствования методов диагностики и прогноза остаточного ресурса (ОР) оборудования. Для этого разработан специальный подход.

Изоляция является одним из основных элементов конструкции высоковольтного оборудования и, как правило, определяет ресурс большинства типов аппаратов. Ресурс оборудования в эксплуатации складывается из естественного процесса старения изоляции и износа, полученного в результате эксплуатационных воздействий (импульсные напряжения, короткие замыкания и т.д.). Для оценки взаимосвязи остаточного ресурса оборудования с эксплуатационными воздействиями необходимы данные о контроле оборудования и его «жизненном» цикле, т.е. статистические данные об отказах каждого типа оборудования, включающие в себя диагностическую информацию. Как правило, такие базы данных называются ограниченными слева и цензурированными справа [2].

При прогнозировании времени отказа особую актуальность приобретает выяснение того, являются ли выбранные в гипотезе диагностические критерии связанными с временами эксплуатации оборудования. При наличии такой зависимости рассчитывается

подходящая математическая модель и оценивается значения ее параметров. Например, для вводов и трансформаторов тока с конденсаторной изоляцией, в качестве независимых переменных можно выделить: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ($tg\delta_1$), изменение емкости основной изоляции (ΔC_1), изменение $tg\delta_1$ ($\Delta tg\delta_1$), скорость изменения $tg\delta_1$ ($v_tg\delta_1$), коэффициент температурной зависимости $tg\delta_1$ (α). Таким образом выдвигается гипотеза о связи $tg\delta_1$, ΔC_1 , $\Delta tg\delta_1$, $v_tg\delta_1$, α и количества лет в эксплуатации (t_e) с ОР (R_o) изоляции. При этом все диагностические критерии являются прогностическими для долгосрочного прогноза вероятности отказа аппарата. Параметр ΔC_1 является мгновенным признаком частичного отказа и служит прогнозом предстоящего полного отказа, его связь с отказом аппарата установлена и в подтверждении не нуждается [3].

В качестве базовой модели предлагается использовать модель пропорциональных интенсивностей Кокса, это наиболее общая регрессионная модель, поскольку она не связана с предположениями относительно распределения времени безотказной работы. Модель предполагает, что процесс износа ресурса происходит независимо от эксплуатационных воздействий. Далее предполагается, что вероятность отказа в любой момент времени рассчитывается из значения, зависящего от времени (процесса старения) и коэффициента (зависящего от параметров воздействия на аппарат) [4, 5, 6, 7]. После аварийного воздействия, значения критериев изменяются, при этом значения ОР должно пересчитываться, поэтому модель должна применяться только в составе системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции. Так как стандартная ошибка оценки функции вероятности безотказной работы (ВБР) на порядки ниже самой оценки, то именно функция ВБР используется для прогностических целей. Предложенная модель предполагает, что функция ВБР имеет некоторый уровень, являющийся функцией независимых переменных. Модель для расчета мгновенной ВБР может быть и записана в следующем виде:

$$S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v_tg\delta_1, \alpha)) = S_0(t)^{exp(b1 \cdot tg\delta_1 + b2 \cdot \Delta tg\delta_1 + b3 \cdot v_tg\delta_1 + b4 \cdot \alpha)} \quad (1)$$

где $S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v_tg\delta_1, \alpha))$ – результирующая интенсивность, при заданных для соответствующего наблюдения значениях ковариат,

$S_0(t)$ – базовая функция интенсивности, она равна интенсивности в случае, когда все независимые переменные равны нулю.

В табл. 1 приведены результаты расчета модели для маслонаполненных трансформаторов тока:

- Beta — приведены оценки параметров (коэффициенты при соответствующих переменных в регрессионном уравнении),
 - SE — стандартные ошибки,
 - значения t-критерия, (отношение соответствующих элементов первого и второго столбца), значимыми считаются параметры с $t > 2.0$.
 - p - уровень значимости (значимы при $p < 0.05$).
- Выдвинутая гипотеза подтверждается.

Таблица 1. Результаты расчета модели

	Beta	SE	t-value	p
$tg\delta_1$	4,09973	1,141208	3,592444	0,000328
$v_tg\delta_1$	8,26857	3,992332	2,071114	0,038356
α	23,52839	8,749141	2,689223	0,007166
$\Delta tg\delta_1$	2,21677	1,039463	2,132611	0,032964

Таким образом, обобщенный алгоритм сводится к следующему:

- определяются базовые функции зависимости диагностических параметров от времени;
- на базе модели Кокса составляется функция вероятности безотказной работы конкретного типа оборудования, зависящая от отклонений значений диагностических параметров от базовых;
- рассчитывается критическая вероятность безотказной работы;
- рассчитывается время достижения критической вероятности безотказной работы при предположении о дальнейшем естественном старении изоляции;
- проводится постоянная автоматическая корректировка остаточного ресурса с учётом изменения эксплуатационных воздействий, при помощи СНК [8].

На рисунке 2 представлена схема модернизации эксплуатационного контроля на примере маслонаполненных трансформаторов тока при помощи СНК с функций оценки остаточного ресурса [9].

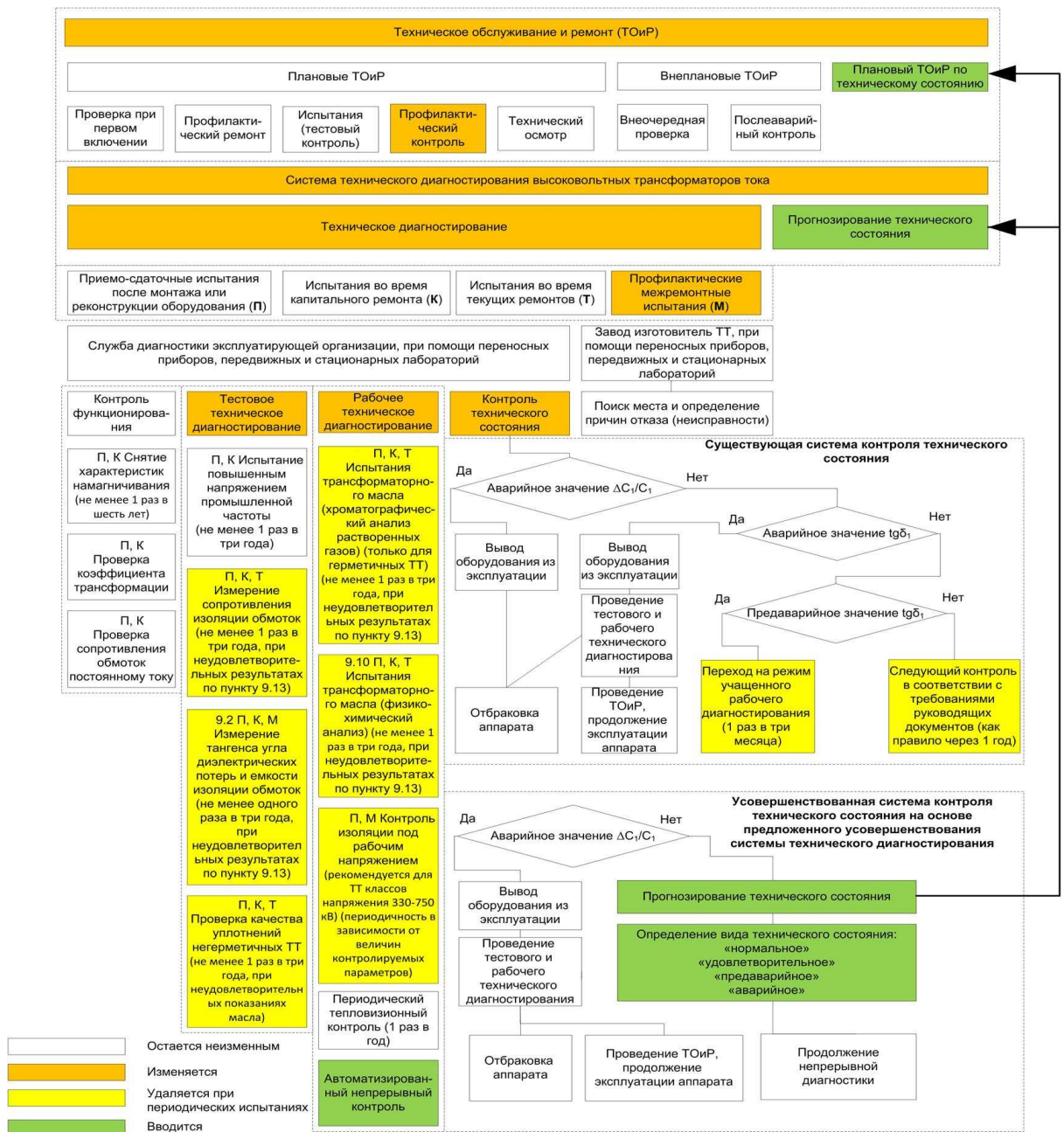


Рис. 2. Структурная схема технического диагностирования на примере ТТ.

Прогнозирование позволяет ввести принципиально новый элемент в систему технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) — плановые ТОиР по техническому состоянию.

Ухудшение технического состояния основной изоляции аппаратов происходит непрерывно, как при работе в номинальных, так и в аварийных и недогруженных режимах. Разработанная модель учитывает, что процесс износа происходит в разных режимах работы с разной интенсивностью.

На данный момент такой подход реализован для трансформаторов тока. Ведутся разработки подобных моделей для других типов оборудования.

Целью представленной разработки является:

- сокращение перечня необходимых периодических испытаний,
- упрощение алгоритма контроля технического состояния оборудования и существующей методики технического диагностирования,
- снижение влияния человеческого фактора на результаты диагностики,
- а также прогнозирование технического состояния, планирование ремонтов и замен, а также переход от устаревшей системы периодического обслуживания, к обслуживанию по техническому состоянию оборудования.

Перечень источников

1. *Бударгин О.М.* Потребности ОАО «ФСК ЕЭС» в электротехническом оборудовании на десятилетнюю перспективу для обеспечения надежной эксплуатации, технического перевооружения и развития ЕНЭС/ Бударгин О.М.// МА «ТРАВЭК»: VII междунар. науч.-техн. конф. «Силовые трансформаторы и системы диагностики», 22 – 23 июня 2010 г. : докл. — 1, — 2010. — 14 с.

2. *Фокин Ю.А.* Оценка надежности систем энергоснабжения / Фокин Ю.А., Туфанов В.А. // М.: Энергоатомиздат, — 1981. — 224 с., ил.

3. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. М. : Энергоатомиздат, 1992 — 240 с. : ил.

4. *Li Z.* Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures / Zhiguo Li, Shiyu Zhou, Suresh Choubey, Crispian Sievenpiper // IEEE Transactions. — 2007, — Vol. 39, Issue 3, pp. 303 — 315.

5. *Hong Y.* Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data / Y.Hong, W.Q.Meecker J.D. McCalley // Annals of Applied Statistics. — 2009, — Vol. 3, No. 2, pp. 857-879.

6. *Cox D.R.* Regression Models and Life-Tables / D.R. Cox // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). — 1972, — Vol. 34, No.2. — pp. 187 — 220.

7. *Боровиков В.* STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. / Боровиков В. — СПб.: Питер. — 2003. — 688 с.

8. *Сахно А. А.* Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330 – 750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А. А. Сахно // Вестник НТУ «ХПИ» — 2010. — № 55. — С. 97—106.

9. *Рассальский А. Н.* Совершенствование системы диагностики высоковольтных трансформаторов тока на основе автоматизированного непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса / А. Н. Рассальский, П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // Вестник НТУ "ХПИ" — 2011. — № 48. — С. 50—55.