

Прогнозирование срока службы силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей

МАЙОРОВ А. В., канд. техн. наук

ЛЬВОВ М. Ю., доктор техн. наук, АО «ОЭК», Москва

ЛЬВОВ Ю. Н., доктор техн. наук, АО «НЦ ФСК ЕЭС»

gmonster-best@yandex.ru

115201, Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3 КОМАРОВ В. Б., канд.

хим. наук ЕРШОВ Б. Г., член корр. РАН, доктор хим. наук ИФХЭ РАН,

Москва



А. В. Майоров М. Ю. Львов Ю. Н. Львов В. Б. Комаров Б. Г. Ершов

В настоящее время в соответствии с действующими ГОСТ для силовых трансформаторов, разработанных до 1 января 2008 г., установлен срок службы не менее 25 лет, для силовых трансформаторов, разработанных после 1 января 2008 г., — не менее 30 лет. Результаты исследований и обобщение накопленного опыта эксплуатации позволяют для силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей напряжением 110—500 кВ прогнозировать срок их службы 50 - 60 лет.

Ключевые слова: силовой трансформатор, срок службы, электрическая изоляция, фильтры непрерывной очистки трансформаторного масла.^f

Надёжность электроснабжения потребителей в значительной степени определяется надёжностью эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше. Данное оборудование составляет значительный актив электросетевых компаний и вопросы управления всегда остаются актуальными и значимыми. Построение концепции управления активами при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше должно подразумевать оценку прогнозирования срока службы существующего оборудования, поскольку парк стареющего оборудования нарастает, а замена данного вида оборудования требует значительных финансовых и временных затрат.

В настоящее время в России установлены сроки службы силовых трансформаторов:

— для силовых трансформаторов, разработанных до 1 января 2008 г., — не менее 25 лет (ГОСТ 11677-85 [1]);

— для силовых трансформаторов, разработанных после 1 января 2008 г., — не менее 30 лет (ГОСТ Р 52719-2007 [2]).

Указанное положение свидетельствует о том, что если трансформатор изготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ, эксплуатируется в расчётных параметрах и его обслуживание проводится в соответствии с действующими требованиями, установленными соответствующими нормативными документами, то трансформатор должен отработать не менее указанного срока службы.

Следует отметить, что более половины эксплуатируемых в России силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше имеют наработанный срок службы более 25 лет. Причём эксплуатация трансформаторов с длительными сроками службы происходит во многих развитых странах мира.

Накопленный многолетний опыт эксплуатации силовых трансформаторов (автотрансформаторов) показывает, что, как правило, они сохраняют работоспособное состояние после 25 - 30 лет. Как показывает российская и мировая практика, замена силовых трансформаторов (автотрансформаторов) напряжением 110 кВ и выше после отработки установленных минимальных сроков службы — технически не обоснована и экономически нецелесообразна.

В соответствии с изменениями, внесёнными в Стратегию развития электросетевого комплекса и утверждёнными распоряжением Правительства РФ от 29.11.2017 г. № 2664-р, с 2018 г. в России должен реализовываться постепенный переход от системы планово-предупредительных ремонтов на объектах электросетевого хозяйства к организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учётом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков). При этом указывается, что при условии эксплуатации оборудования без отклонения от номинальных параметров и соблюдения процедур по продлению срока эксплуатации ограничения дальнейшей эксплуатации оборудования могут быть сняты.

Основным вопросом для оценки возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации силового трансформатора или принятия решения о выводе его из эксплуатации и замене является определение технического состояния с оценкой предельного состояния, которая должна опираться на соответствующие критерии. Основные элементы силового трансформатора (автотрансформатора), определяющие его предельное состояние, — обмотки и магнитопровод [3]. Прочие элементы: высоковольтные вводы, переключатели ответвлений, маслоохладители, двигатели

ли маслосососов и др. при наличии дефектов должны подлежать ремонту или замене, не требующей замены трансформатора.

Практически все показатели оценки состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов, указанные в РД «Объём и нормы испытаний электрооборудования» [4], за исключением степени полимеризации бумажной изоляции и сопротивления короткого замыкания трансформатора, являющихся основными показателями предельного состояния трансформатора, могут быть приведены в соответствие установленным требованиям с помощью ремонтно-профилактических мероприятий или путём замены отдельных элементов и узлов трансформатора.

Основные показатели предельного состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше:

— износ витковой изоляции (в соответствии с требованиями РД «Объём и нормы испытаний электрооборудования» ресурс бумажной изоляции обмоток считается исчерпанным при снижении степени полимеризации бумаги до 250 ед.);

— опасная деформация обмоток (в соответствии с требованиями РД «Объём и нормы испытаний электрооборудования» значения сопротивления короткого замыкания трансформатора, измеренные в процессе эксплуатации и при капитальном ремонте, не должны превышать исходные более чем на 3 %).

Наиболее уязвимый элемент, фактически определяющий срок службы силовых трансформаторов, — витковая изоляция обмоток. Согласно РД «Объём и нормы испытаний электрооборудования» [4], показателем, определяющим полное исчерпание ресурса бумажной изоляции обмоток, является значение степени полимеризации 250 ед.

При достижении степени полимеризации бумажной изоляции 250 ед. происходит не менее чем 4-кратное снижение механической прочности изоляции по сравнению с исходной и образование воды (дегидратация), которая может составлять до 6 % и более (выход воды из бумаги, имеющей степень полимеризации более 250 ед., составляет $(10^{-3} - 10^{-2})$ % массы и не имеет существенного значения) [3].

Подобная изоляция характеризуется высоким риском повреждения от осевого давления электродинамических усилий при воздействии токов КЗ на изоляцию обмоток и местного увеличения массы влаги, приводящего к разогреву участка изоляции диэлектрическими потерями и сопровождая

№	Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	' κ^p '	Коэффициент корреляции прямой зависимости $1n(P_v) = \kappa^p t$
1	Сетевые силовые трансформаторы и автотрансформаторы напряжением 110 - 500 кВ	$0,02142 \pm 0,00405$	$>0,935$
2	Силовые трансформаторы промышленных предприятий	$0,0351 \pm 0,00286$	$>0,99$
3	Блочные силовые трансформаторы и автотрансформаторы тепловых электростанций напряжением 110 — 500 кВ	$0,04897 \pm 0,00398$	$>0,99$

ющемся прогоранием изоляции при рабочем напряжении. В свою очередь, при повреждении изоляции на проводе (разрыв или трещина) значительно, в 1,5 - 2 раза, снижается электрическая прочность между витками. Расчётные запасы электрической прочности изоляции в различных конструкциях обмоток трансформатора колеблются от 1,1 до 1,7 [5]. Развитие указанных процессов ведёт к существенному росту риска повреждения трансформатора при воздействии сквозных токов короткого замыкания, при возникновении грозовых и коммутационных перенапряжений и даже при рабочем напряжении.

Для силовых трансформаторов (автотрансформаторов), длительно эксплуатируемых в России, при постоянстве структурных характеристик целлюлозы выпускаемых в России электроизоляционных бумаг (индекс кристалличности 73 %), а также относительном постоянстве содержания полярных соединений в трансформаторном масле при оснащении трансформаторов фильтрами непрерывной очистки масла (термосифонными, адсорбционными) и их регламентной эксплуатации, уравнение для определения срока службы t (годы), основанное на кинетических закономерностях изменения степени полимеризации изоляции обмоток P_v в эксплуатации, определяется в виде [6]:

$$\ln = \ln + \kappa^p t, \quad (1)$$

$$P_v P_{v0}$$

где P_{v0} — исходная (начальная) средневязкостная степень полимеризации витковой бумажной изоляции обмоток, ед. ангидроглюкопирозных мономерных фрагментов; κ^p — годовая константа скорости деградации витковой бумажной изоляции обмоток (год).

В таблице приведены максимальные значения эффективных констант скорости деградации витковой бумажной изоляции κ^p для силовых трансформаторов и автотрансформаторов на основании исследований, выполненных АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и ИФХЭ РАН.

Следует отметить результаты известных исследований состояния изоляции обмоток длительно эксплуатируемых трансформаторов в Японии. В работе

[7] для срока службы бумажной изоляции трансформаторов приведено следующее уравнение, связывающее его со степенью полимеризации P :

$$P = (1 - 0,014t)P_0, \quad (2)$$

где P_0 — исходное значение степени полимеризации бумажной изоляции обмоток трансформатора, ед. мономерных фрагментов целлюлозы; t — срок службы трансформатора на момент измерений «текущего» значения степени полимеризации, годы.

Указанное соотношение справедливо, главным образом, для трансформаторов зарубежного производства. Силовые трансформаторы зарубежного производства в своей массе не оборудованы системой фильтров непрерывной очистки масла (термосифонные, адсорбционные). Состояние наружных слоёв изоляции, омываемых маслом в процессе длительной эксплуатации, как правило, хуже, чем внутренних слоёв, контактирующих с медными токоведущими частями. Последнее определено связано со значительным влиянием окисленных и кислых продуктов старения бумажной изоляции и масла на процесс деградации изоляции [8].

В длительно эксплуатируемых силовых трансформаторах отечественного производства, оборудованных системой термосифонных и адсорбционных фильтров, для наружных и внутренних слоёв изоляции наблюдается иная картина деградации. Из приведённых в [8] данных следует, что при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов с регламентной работой термосифонных и адсорбционных фильтров, вследствие постоянно низкой концентрации катализаторов шламообразования и деградации бумажной изоляции, значение степени полимеризации наружных слоёв витковой изоляции обмоток выше, чем внутренних слоёв, непосредственно прилегающих к меди. Это указывает на то, что у отечественных трансформаторов кинетика деградации витковой изоляции обмоток определяется, главным образом, температурой токоведущего провода обмотки, т. е. нагрузкой трансформатора, а не концентрацией катализаторов деградации и шламообразования целлюлозной изоляции в трансформатор-

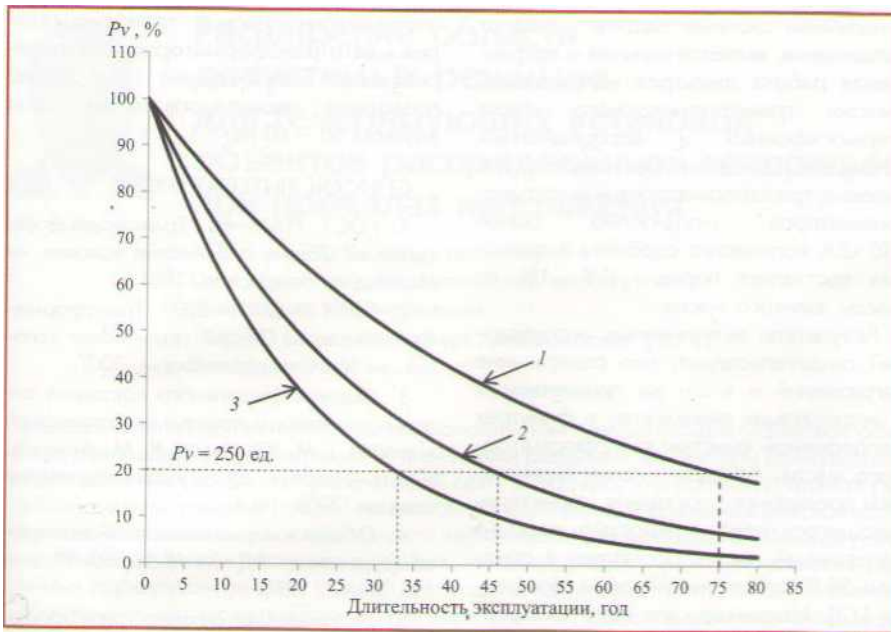


Рис. 1. Зависимость глубины старения бумажной изоляции обмоток от длительности эксплуатации различных групп трансформаторов:

1 сетевые; 2 — промышленные предприятия; 3 — блочные тепловые электростанции

тельный разброс — от 750 до 1970 ед. мономерных фрагментов целлюлозы [6]. Также отмечалось, что при эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов с намоточной бумагой с различной исходной степенью полимеризации при прочих равных условиях эксплуатации достижение предельно-допустимого износа изоляции (т. е. достижение значения степени полимеризации $P = 250$ ед., при котором ресурс изоляции считается исчерпанным) может иметь разброс порядка 12 лет.

Как следует из рис. 1, расчётный срок службы витковой изоляции с исходной степенью полимеризации $P_{v0} = 1250$ ед. в соответствии с [9] для сетевых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 — 500 кВ составляет 75 лет. Это примерно в 2 раза больше срока службы витковой изоляции блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов ТЭС напряжением 110 - 500 кВ (33 года) и обусловлено более плотным графиком нагрузки блочных трансформаторов ТЭС.

Опыт эксплуатации показывает, что исчерпание ресурса изоляции обмоток длительно работающих силовых трансформаторов и автотрансформаторов наблюдается, прежде всего, в парке блочных трансформаторов ТЭС, имеющих высокие нагрузки и соответственно более быстрое исчерпание ресурса изоляции, чем у крупных сетевых трансформаторов. Увеличение нагрузки, в первую очередь, приводит к росту температуры изоляции в процессе эксплуатации, в результате чего ускоряются все физико-химические процессы, приводящие к деградации изоляции.

Прогноз по сроку службы в значительной мере согласуется с результатами анализа удельной повреждаемости силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 - 500 кВ [10]. На рис. 2 приведена зависимость удельной повреждаемости блочных и сетевых силовых трансформаторов и автотрансформаторов с внутренними КЗ от срока эксплуатации. Видно, что удельная повреждаемость блочных трансформаторов монотонно растёт и сопровождается развитием внутренних КЗ с увеличением срока эксплуатации. После 37 лет эксплуатации трансформаторов происходит относительно резкое нарастание удельной повреждаемости, связанное с проявлением факторов старения оборудования, и к 45 годам приближается « 3 %. Согласно позиции СИГРЭ считается, что продолжение эксплуатации экономически невыгодно, если удельная повреждаемость трансформаторов превышает 3 % в год [11].

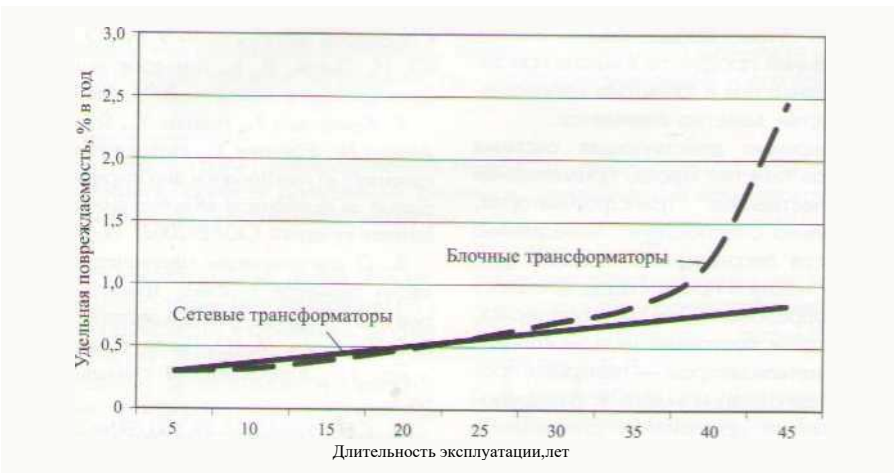


Рис. 2. Зависимость удельной повреждаемости блочных и сетевых силовых трансформаторов и автотрансформаторов с внутренними КЗ напряжением 110- 500 кВ. мощностью (в МВА и баке от срока эксплуатации

ном масле. Поэтому, согласно данным таблицы, старение бумажной изоляции отечественных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, оборудованных фильтрами непрерывной очистки масла, на 98 - 99 % определяется величиной нагрузки и исходной степенью полимеризации намоточной бумаги. Доля влияния всех остальных факторов на старение указанных трансформаторов составляет не более 1 - 2 %. При этом, в соответствии с [9] степень полимеризации исходной (новой) изоляции при изготовлении трансформатора должна быть не менее 1250 ед. мономерных фрагментов целлюлозы.

На рис. 1 приведено семейство кривых $P_v (\%) = F(t)$ старения бумажной изоляции отечественных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в соответствии с формулой (1) и данными таблицы при значении исходной степени полимеризации $P^{\wedge} = 1250$ ед.

Следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 645-89 «Бумага кабельная для изоляции кабелей напряжением от 110 до 500 кВ. Технические условия» значение исходной степени полимеризации не нормируется.

При этом выполненные ранее исследования показали, что значения степени полимеризации исходной намоточной бумаги, применяемой при изготовлении трансформаторов, могут иметь значи

Анализ повреждаемости блочных трансформаторов ТЭС мощностью 63 МВА и более напряжением 110 - 500 кВ со сроком эксплуатации более 25 лет показывает, что примерно 45 % общего числа повреждений [без учёта повреждений высоковольтных вводов и устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН)], сопровождавшихся внутренними короткими замыканиями, связано с возникновением витковых замыканий при значительном износе изоляции [10]. Подобное не наблюдается для сетевых силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 - 500 кВ.

Обобщённый анализ многолетних исследований авторов свидетельствует, что у эксплуатируемого в электрических сетях работоспособного парка силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 - 500 кВ при выполнении установленных требований показатели трансформаторного масла находятся в зоне, не достигающей установленных предельно допустимых значений в период эксплуатации до 50 и более лет. Отметим, что существующая система эксплуатации и ремонтно-профилактических мероприятий, реализуемая на подстанциях электрических сетей России, позволяет, как правило, обеспечивать работу указанного оборудования с показателями изоляции, находящимися в зоне допустимых нормируемых значений, на протяжении всего срока эксплуатации без замены трансформаторного масла.

Возможность увлажнения и загрязнения изоляции в процессе эксплуатации, а также развитие окисления масла в значительной степени зависят от наличия и типа системы защиты масла от увлажнения. С 80-х годов силовые трансформаторы и автотрансформаторы напряжением 220 кВ и выше оснащали плёночной защитой масла от увлажнения. Ранее на трансформаторах применяли систему азотной защиты или «свободное дыхание» (отсутствовала система защиты масла от увлажнения). Следует отметить, что многие крупные силовые трансформаторы и автотрансформаторы, которые вводили в эксплуатацию со «свободным дыханием» или с системой азотной защиты, в дальнейшем прошли модернизацию с установкой плёночной защиты масла от увлажнения.

Одним из существенных факторов, влияющих на показатели состояния бумажной изоляции и трансформаторного масла в процессе длительной эксплуатации трансформаторов наряду

с наличием системы защиты масла от увлажнения, является наличие и эффективная работа фильтров непрерывной очистки трансформаторного масла (термосифонных и адсорбционных фильтров). При этом, как известно, для силовых трансформаторов и автотрансформаторов мощностью более 630 кВА количество сорбента в фильтрах составляет порядка 0,8 — 1% от массы залитого масла.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что содержание загрязнений и влаги на применяемых в эксплуатации силикагелях в фильтрах непрерывной очистки трансформаторного масла, при достижении силикагелем предельного состояния, характеризующегося невозможностью сорбции загрязнений масла, составляет в среднем 59 % собственной массы силикагеля [12]. Например, для автотрансформатора АОДЦТН/500/220 содержащего 40 т трансформаторного масла при наличии регламентных 420 кг силикагеля в фильтрах непрерывной очистки до замены силикагеля может адсорбироваться до 247 кг продуктов старения и окисления трансформаторного масла. При этом концентрация кислых и окисленных продуктов в масле при замене силикагеля в фильтрах непрерывной очистки заметно снижается.

Непрерывно действующая система фильтров очистки масла, применяемая в отечественных трансформаторах, значительно способствует замедлению процессов деградации бумажной изоляции и масла и препятствует процессу шламообразования за счёт поддержания в масле постоянно низкой концентрации катализаторов — полярных продуктов деградации масла и бумажной изоляции на протяжении длительного срока эксплуатации.

Выводы

1. Расчётный срок службы витковой изоляции с исходной степенью полимеризации R^{\wedge} , соответствующей 1250 ед., для трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей напряжением 110 — 500 кВ составляет 75 лет, что почти в 2 раза превышает расчётный срок службы витковой изоляции блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов теплоэлектростанций напряжением 110 — 500 кВ (33 года). Это обусловлено более плотным графиком нагрузки блочных трансформаторов теплоэлектростанций.

2. Результаты проведённых исследований и обобщение накопленного опыта

эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей напряжением 110 — 500 кВ позволяют прогнозировать их срок службы 50 - 60 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ 11677—85.* Тр»<форматоры силовые. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
2. *ГОСТ Р 52719—2007.* Трансформаторы силовые. Общие технические условия. — М.: Ст»щартшформ, 2007.
3. *Оценка предельного состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов / М. Ю. Алов, К. М. Антипов, Ю. Н. Лавое и др. // Электрические станции. 2008. № 1.*
4. *Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300—97.* — М.: ЭНАС, 1998.
5. *Эксплуатация силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей кхоса изоляции / Б. В. Ванхи, Ю. Н. Алов, М. Ю. Львов, Л. Н. Шифрни // Электрические станции. 2004. № 2.*
6. *Старение целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов в процессе эксплуатации / М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов, В. Б. Комаров и др. // Электрические станци. 2004. N® 10.*
7. *Kawamura T., Fushim Y., Shimato T., Amano N., Ebisawa Y., Hosokawa N. Improvement In maintenance and nspction and pursuit of economical effectiveness of transformers in Japan. CIGRE-2002, 12-107.*
8. *О регенерации целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / В. Б. Комаров, М. Ю. Львов, Ю. Н. Львов и др. // Электрические станции. 2004. № 6.*
9. *СТО 56947007-29.180.091-2011.* Типовые технические требования к трансформаторам, автотр»<форматорам (распределительным, силовым) классов напряжения 110 - 500 кВ. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
10. *Львов М. Ю.* Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // *Электричество.* 2010. № 2.
11. *Лоханин А. К., Соколов В. В.* Обеспечение работоспособности маслонаполненного высоковольтного оборудования после расчёта срока службы // *Электро.* 2002. № 1.
12. *Физико-химические аспекты эффективности применения фильтров непрерывной очистки масел силового трансформаторного оборудования / М. М. Львова, В. Б. Комаров, Е. О. Лютыко и др. // Электро.* 2012. № 3.