

УДК 621.039

КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ВИТКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКА ИХ СЛУЖБЫ

© 2020 г. В. Б. Комаров^{1, *}, С. А. Кулюхин¹, А. Ф. Селиверстов¹, В. Н. Бондарева¹,
Ю. О. Захарова¹, Е. О. Лютько², Ю. Н. Львов², М. Ю. Львов³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии
и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

²Акционерное общество “Научно-технический центр Федеральной сетевой компании
Единой энергетической системы”, Москва, Россия

³Акционерное общество “Объединенная энергетическая компания”, Москва, Россия

*e-mail: komvb@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

После доработки 26.03.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Приведен массив экспериментальных значений средневязкостной степени полимеризации целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов различных типов с различной нагрузкой. Показано, что зависимости обратных значений степени полимеризации изоляции обмоток от времени эксплуатации для всех типов трансформаторов, произведенных и эксплуатируемых в России, удовлетворительно аппроксимируются полулогарифмическими анаморфозами. Проведен корреляционный анализ полулогарифмических анаморфоз обратных значений степени полимеризации изоляции обмоток от времени эксплуатации для различных нагрузок силовых трансформаторов. Установлены “годовые” константы скорости деструкции изоляции обмоток для блочных (напряжением 110 кВ и выше) и сетевых (напряжением до 500 кВ) трансформаторов, а также для сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ и мощностью 25 000 кВА, пригодные для расчетов остаточного срока службы витковой изоляции обмоток и трансформатора в целом. Показано, что глубина деструкции витковой изоляции обмоток отечественных силовых трансформаторов, оборудованных фильтрами непрерывной очистки масла, на 91–99% определяется величиной нагрузки и исходной степенью полимеризации намоточной электроизоляционной бумаги, использованной для витковой изоляции обмоток при изготовлении силового трансформатора. Доля влияния всех остальных факторов на деструкцию витковой изоляции обмоток силовых трансформаторов составляет от 1 до 9%. В зависимости от исходной степени полимеризации электроизоляционной бумаги и нагрузки трансформаторов рассчитаны интервалы общих сроков службы витковой изоляции силовых трансформаторов. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с известными данными по повреждаемости силовых трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, витковая целлюлозная изоляция обмоток, деструкция, кинетика, остаточный срок службы, прогнозирование

DOI: 10.31857/S0002331020010057

К 2011–2012 годам износ трансформаторных подстанций РФ с общей установленной мощностью более 400 млн кВА напряжением 35–220 кВ составлял 17 000 единиц. При этом объемы основного оборудования, необходимые для выполнения программы реновации, включали силовые трансформаторы в количестве 12000 шт. По состоянию на 2017 год ситуация существенно ухудшилась: уровень изношенности трансформаторных подстанций электросетевого хозяйства составляет, в среднем, 83% [1].

Ранее концерном “Росэнергоатом” было указано, что на сегодняшний день наибольшее количество отказов связано с работой электротехнического оборудования энергоблоков АЭС, то есть с блочными трансформаторами. Отмечены две причины этого: недостаточный контроль эксплуатационного оборудования и невозможность прогнозирования отказов [2].

Последнее является актуальным не только для концерна “Росэнергоатом”, но и для всей энергетической отрасли в целом. Фактор старения оборудования, в особенности блочных трансформаторов, еще больше обостряет проблему. При этом наиболее тяжелыми повреждениями силовых трансформаторов являются внутренние короткие замыкания, сопровождающиеся примерно в 30% случаев взрывами и пожарами оборудования [3].

По указанным причинам исследование кинетики деструкции витковой изоляции обмоток является одним из важнейших фундаментальных и прикладных вопросов физической химии эксплуатируемых силовых трансформаторов. Знание константы скорости деструкции изоляции обмоток позволяет по измеренному “текущему” значению ее средней степени полимеризации прогнозировать остаточный срок службы не только витковой изоляции, но и силового трансформатора в целом. Это является важной народнохозяйственной задачей.

Для трансформаторов, длительно эксплуатируемых в России, при постоянстве структурных характеристик целлюлозы выпускаемых электроизоляционных бумаг (индекс кристалличности 73%) [4] и относительном постоянстве содержания полярных соединений в трансформаторном масле при нормально работающих фильтрах непрерывной очистки [5], применима оценка срока службы изоляции для различных групп силовых трансформаторов с примерно одинаковой нагрузкой, основанная на кинетических закономерностях изменения степени полимеризации изоляции обмоток (P_v) в процессе эксплуатации [6–11]. При этом для принятия решений о продлении срока службы оборудования руководствуются прямыми измерениями значений показателя степени полимеризации изоляции обмоток [12, 13].

Задача настоящей работы состояла в получении достаточно точных значений констант скорости деструкции изоляции силовых трансформаторов различных типов на основе полученного коллективом авторов к настоящему времени массива данных значений показателя степени полимеризации витковой изоляции обмоток блочных и сетевых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, а так же трансформаторов промышленных предприятий напряжением 35 кВ для обеспечения расчетов их остаточного срока службы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы витковой изоляции силовых трансформаторов различных типов и с различной нагрузкой отбирались при ремонте или подсливе масла через люки в доступных местах одной из верхних катушек обмотки. Вырезался фрагмент или несколько крайне небольших фрагментов общей массой 0.3–0.5 г внешнего слоя витковой изоляции таким образом, чтобы не происходило прорезание других слоев. При этом вырезаемая площадь образцов была меньше площади внешней поверхности витка (располагалась внутри с некоторым отступом между верхним и нижним краем витка) с од-

ной стороны и не выходила за ширину намоточной бумаги (чтобы не нарушить плотность намотки).

При наличии хрупкой и ветхой изоляции внешнего слоя витка аккуратно отделяли необходимый фрагмент (или несколько фрагментов) внешнего слоя в месте ее отслоения.

Отобранный образец изоляции помещался в чистую и просушенную стеклянную емкость с притертой крышкой и заливался маслом из бака обследуемого трансформатора. Емкости с образцами изоляции, помещенными в трансформаторное масло, хранились при комнатной температуре в защищенном от света месте.

Подготовка пробы к анализу, согласно [13], включала в себя отмывку пробы целлюлозной изоляции без потери ее массы от масла и присадок 1,4-диоксаном и водой при температуре 90°C с последующей осушкой до воздушно-сухого состояния.

Средневязкостную степень полимеризации образцов новых электроизоляционных бумаг и витковой изоляции силовых трансформаторов определяли по вязкости ее растворов в этилендиаминовом комплексе кадмия (кадоксене) [13]. Коэффициент корреляции и среднеквадратичное отклонение для зависимостей обратных значений “текущей” степени полимеризации изоляции обмоток трансформаторов ($1/P_V$) от срока службы (τ) в виде полулогарифмических анаморфоз рассчитывали аналогично работе [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены значения степени полимеризации различных типов электроизоляционной бумаги, используемых при изготовлении силовых трансформаторов.

Отметим, что бумаги со средневязкостной степенью полимеризации, равной 1970 и 1600, являются крепированными и используются в России главным образом при изготовлении эпоксидно-целлюлозных пластиков для трансформаторных высоковольтных вводов конденсаторного типа (изоляция типа RIP) [14].

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 электроизоляционной бумаги, используемой для изготовления обмоток силовых трансформаторов, не нормируется.

Электроизоляционные бумаги в России для изготовления обмоток трансформаторов выпускались небольшим числом предприятий с практически неизменными технологией и источниками сырья. Поэтому наиболее вероятный интервал исходной степени полимеризации электроизоляционных бумаг Российского производства известен и составляет 900–1300 (табл. 1) [6–8]. Этот интервал мы используем ниже для оценки эффективной кинетической константы деструкции изоляции трансформаторов и определения остаточного срока службы изоляции по имеющимся экспериментальным данным.

Таблица 1. Степень полимеризации новых электроизоляционных бумаг, используемых в производстве силовых трансформаторов

№ п.п.	Производитель электроизоляционной бумаги или ее тип	Средневязкостная степень полимеризации, P_{V0}
1	Weidmann Electrical Technology AG, Швейцария	1970
2	ПАО “Малинская бумажная фабрика–Вайдманн”, Украина	1600
3	Электроизоляционные бумаги по ГОСТ 645-89 производства России	1300
4		900
5		750

Сотрудниками ИФХЭ РАН совместно с коллегами из АО “НТЦ ФСК ЕЭС” установлено, что для обеспечения срока службы не менее 30 лет, безотносительно нагрузки (согласно ГОСТ Р 52719–2007 “Трансформаторы силовые. Общие технические условия”), силовых трансформаторов, разработанных после 1 января 2008 года, исходная степень полимеризации электроизоляционной бумаги должна составлять не менее 1250 ± 50 ангидроглюкопиранозных мономерных фрагментов целлюлозы [11]. Указанное значение параметра P_{V0} введено в стандарты организаций ПАО “ФСК ЕЭС”, ООО “Тольяттинский Трансформатор” и других энергетических компаний России.

Здесь следует отметить то, что уже небольшое количество экспериментальных данных по степени полимеризации витковой изоляции обмоток, полученное нами ранее [6, 7], позволило определить характер ее зависимости от времени эксплуатации трансформатора.

Известно [6–11], что кинетика деструкции витковой изоляции силовых трансформаторов, произведенных и эксплуатируемых в России, удовлетворительно описывается уравнением полулогарифмической анаморфозы следующего вида:

$$\ln \frac{1}{P_V} = \ln \frac{1}{P_{V0}} + K_{\text{эфф}} \tau, \quad (1)$$

где P_V – “текущее” (на момент отбора пробы) значение степени полимеризации витковой бумажной изоляции обмоток силового трансформатора, ед.; P_{V0} – исходная (начальная) степень полимеризации витковой бумажной изоляции обмоток, ед.; $K_{\text{эфф}}$ – эффективная “годовая” константа скорости деструкции витковой бумажной изоляции обмоток (год^{-1}).

Особо отметим, что ресурс бумажной изоляции обмоток считается исчерпанным при снижении степени полимеризации бумаги до 250 единиц ангидроглюкопиранозных мономерных фрагментов целлюлозы. При этом вероятность повреждения трансформатора вследствие деструкции изоляции обмоток при ее степени полимеризации 250 и ниже равна 1 [7–9, 15]. Снижение в процессе эксплуатации степени полимеризации бумажной изоляции обмоток силового трансформаторного оборудования до 250 приводит к не менее чем 4-х кратному снижению механической прочности изоляции обмоток по сравнению с исходной, выделению воды из изоляции, приводящему к повышению влажности масла в оборудовании до 30 г на тонну, и повышению значений концентраций CO_2 и CO в трансформаторном масле и их соотношения ($[\text{CO}_2]/[\text{CO}] > 13$) [7, 8, 16].

При достижении предельного состояния изоляции трансформатора возможны:

- разрушение изоляции обмоток от осевого давления или при воздействии токов короткого замыкания;
- снижение электрической прочности между витками при повреждении изоляции на проводе (разрыв или трещина) в 1.5–2 раза;
- местное увеличение концентрации влаги, сопряженное с разогревом участка изоляции диэлектрическими потерями, сопровождающимся прогоранием изоляции под рабочим напряжением [8, 16].

При этом резко возрастает риск повреждения трансформатора из-за возникновения виткового замыкания при воздействии токов короткого замыкания, грозовых и коммутационных перенапряжений, а также под рабочим напряжением [8, 16].

Также отметим, что согласно данным работы [15], граница зоны риска повреждений вследствие деградации витковой изоляции для силовых трансформаторов, произведенных за рубежом, определена при P_V изоляции равной 450. Нами по соотношению P_V наружных и внутренних слоев витковой изоляции из условия достижения внутренними слоями изоляции предельного износа ($P_V = 250$) определена граница зоны риска при $P_V = 400 \pm 15$ у внешних слоев изоляции верхних катушек обмотки [17].

Из вышесказанного следует, что согласно уравнению (1) при P_{V0} , равной “текущему” значению (P_V) степени полимеризации, и $P_V = 250$, соответствующей полному исчерпанию ресурса бумажной изоляции обмоток, можно определить остаточный срок службы витковой изоляции трансформатора $\tau_{ост}$ (годы) из соотношения:

$$\tau_{ост} = \frac{\ln \frac{P_V}{250}}{K_{эфф}}. \quad (2)$$

К настоящему времени существенно расширен массив данных значений показателя степени полимеризации витковой изоляции обмоток эксплуатируемых блочных и сетевых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, а также трансформаторов промышленных предприятий напряжением 35 кВ. На этой основе в настоящей работе установлены пригодные для прогнозирования остаточного срока службы различных по нагрузке типов силовых трансформаторов значения “годовых” кинетических констант скорости деструкции витковой целлюлозной изоляции обмоток трансформаторов.

В таблице 2 приведены полностью полученные нами результаты измерений степени полимеризации образцов наружных слоев витковой изоляции, отобранных из обмоток блочных трансформаторов, находившихся в эксплуатации.

В таблице 3 также приведены типы, сроки службы, степень полимеризации витковой изоляции обмоток сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ, а также сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА.

Из представленных данных видно, что P_V образцов изоляции обмоток как блочных, так и сетевых трансформаторов с длительными сроками эксплуатации существенно ниже значений P_V исходной электроизоляционной бумаги (табл. 1), что обусловлено деструкцией витковой изоляции обмоток в процессе эксплуатации.

На рисунке 1 (а, б) приведены полулогарифмические анаморфозы для обратных значений степени полимеризации витковой изоляции блочных трансформаторов по данным табл. 2, согласно уравнению (1).

Видно, что они удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями. Прямая (а) соответствует среднему значению степени полимеризации исходной электроизоляционной бумаги 900 ± 50 , а прямая (б) — 1300 ± 50 . При этом константы скорости деструкции витковой изоляции для блочных трансформаторов практически совпадают и составляют 0.04218 ± 0.00377 (а) и 0.04199 ± 0.00412 (б) соответственно. По указанным выше данным в соответствии с соотношением (2) был рассчитан общий срок службы витковой изоляции блочных трансформаторов, приведенный в табл. 4.

Здесь отметим, что поскольку при предельном износе витковой изоляции обмоток, как правило, трансформатор должен быть выведен из эксплуатации и заменен, а его материалы утилизированы, предлагаемый подход позволяет прогнозировать остаточный срок службы не только витковой изоляции обмоток, но и силового трансформатора в целом.

Также отметим, что, согласно данным табл. 3, “текущее” значение степени полимеризации витковой изоляции обмоток сетевых трансформаторов существенно выше, чем у блочных трансформаторов при аналогичных сроках эксплуатации. При этом зависимости обратной степени полимеризации от времени эксплуатации сетевых трансформаторов (рис. 2 и 3), так же как и для блочных трансформаторов, удовлетворительно аппроксимируются полулогарифмическими анаморфозами.

В таблице 4 приведены полностью характеристики процесса деструкции витковой изоляции обмоток различных по нагрузке типов силовых трансформаторов, требуемые для прогнозирования срока их службы.

Таблица 2. Типы, сроки службы и степень полимеризации витковой изоляции обмоток с нагрузкой блочных силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше

№ п.п.	Тип, фаза, заводской номер трансформатора	Срок эксплуатации, лет	Средневязкостная степень полимеризации витковой целлюлозной изоляции обмоток, P_V
–	Электроизоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	900
1	ТДЦ-400000/500 зав. № 89677	19	368
2	ТДЦ-125000/110, фаза Б, зав. №12437	24	302
3	ТРДЦН-80000/110 зав. № 1026479	26	244
4	АТДЦТН-125000/330 зав. № 70581	28	270
5	ТРДЦН-80000/110 зав. № 64324	33	198
6	ТДТНГ-48000/110 зав. № 58909	35	235
–	Электроизоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	1300
7	ТДЦ-125000/110/70, фаза А, зав. № 10775	23	503
8	ТДЦ-125000/110/70, фаза С, зав. № 10775	23	481
9	ТДЦ-125000/110/70, фаза В, зав. № 10775	23	473
10	ДТД-75000/110, зав. № 39008	24	515
11	ТДЦ-125000/110 – 70 зав. № 11603	27	425
12	ТДЦ-125000/110 зав. № 7612	30	306
13	ТДЦ-125000/110 ст. № Т-3, фаза А зав. № 12437	31	343
14	ТДЦ-125000/110 ст. № Т-3, фаза В зав. № 12437	31	305
15	ТДЦ-125000/110 ст. № Т-3, фаза С зав. № 12437	31	286
16	ТДНГУ-63000/110 зав. № 871684	35	317
17	ТДТНГ-15000/110 зав. № 61208	35	303
18	ТДЦ-25000/110 — 6,3, фаза А зав. №10031	36	347

Из представленных выше данных следует, что константы скорости деструкции витковой изоляции обмоток сетевых трансформаторов с одинаковой нагрузкой так же как и для блочных трансформаторов, в целом, не зависят от исходной степени полимеризации намоточной бумаги и в пределах величины ошибок эксперимента достаточно близки (у сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ) или практически совпадают (у сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с

Таблица 3. Типы, сроки службы и степень полимеризации витковой изоляции обмоток сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ, сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА

№ п.п.	Тип, фаза, заводской номер трансформатора	Срок эксплуатации, лет	Средневязкостная степень полимеризации витковой целлюлозной изоляции обмоток, P_V
Обмотки сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ			
–	Изоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	900
19	ТДТН-63000/110-81У1, фаза А зав. № 16039	22	637
20	ТДТН-63000/110-81У1, фаза В зав. № 16039	22	581
21	АТДЦТН – 125000/220/110 зав. № 90415	25	600
22	АТДЦТНГ – 125000/220 зав. № 77787	36	405
23	ТДТН-40000/110/35/6 зав. № 1239	46	345
24	ТДТН-10000/110/35/10 зав. № 69778	47	314
–	Изоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	1300
25	ТДТН-63000/110–81У1, фаза С зав. № 16039	22	740
26	АТДТЦН – 250000/500/110 – 70 зав. № 108268	25	700
27	АТДЦТН – 125000/220 зав. № 90415	25	660
28	ТДТН-16000/110 зав. № 876	42	597
29	АОДЦТГ – 250 000 / 500, фаза 500 кВ зав. № 34122	45	543
30	АОДЦТГ – 250 000 / 500, фаза 220 кВ зав. № 34122	45	571
31	ТДЦТГА-240000/220/110	46	578
–			
32	ТДТН-20000/110/35/6 зав. № 71452	47	510
33	ТДНГ-20000/110 зав. № 737238	49	435
Обмотки сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25 000 кВА			
–	Изоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	900
34	ТДНП-25000/35У1 зав. № 39687	7	664
35	ТДНП-25000/35У-1 зав. № 32948	19	417
36	ТДНП-25000/35У1 зав. № 31702	23	385
–	Изоляционная бумага по ГОСТ 645-89	0	1300
37	ТДНП-25000/35У1 зав. № 36412	16	650
38	ТДНП-25000/35 зав. № 26748	30	414
39	ТДНПВ-25000/35-1 зав. № 22656	35	329

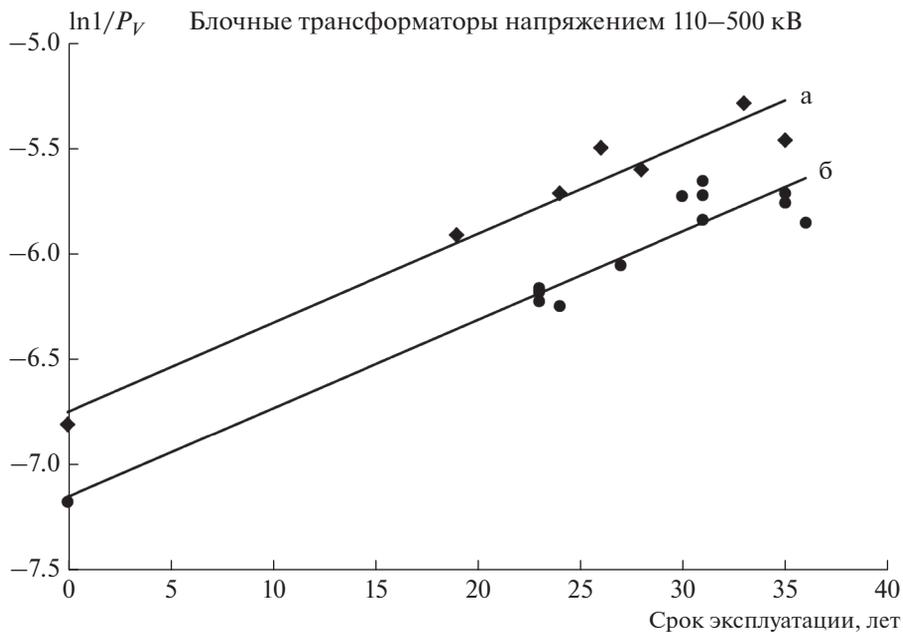


Рис. 1. Полулогарифмические анаморфозы обратных значений степени полимеризации витковой изоляции блочных трансформаторов напряжением 110–500 кВ при среднем значении степени полимеризации исходной электроизоляционной бумаги 900 ± 50 (а) и 1300 ± 50 (б).

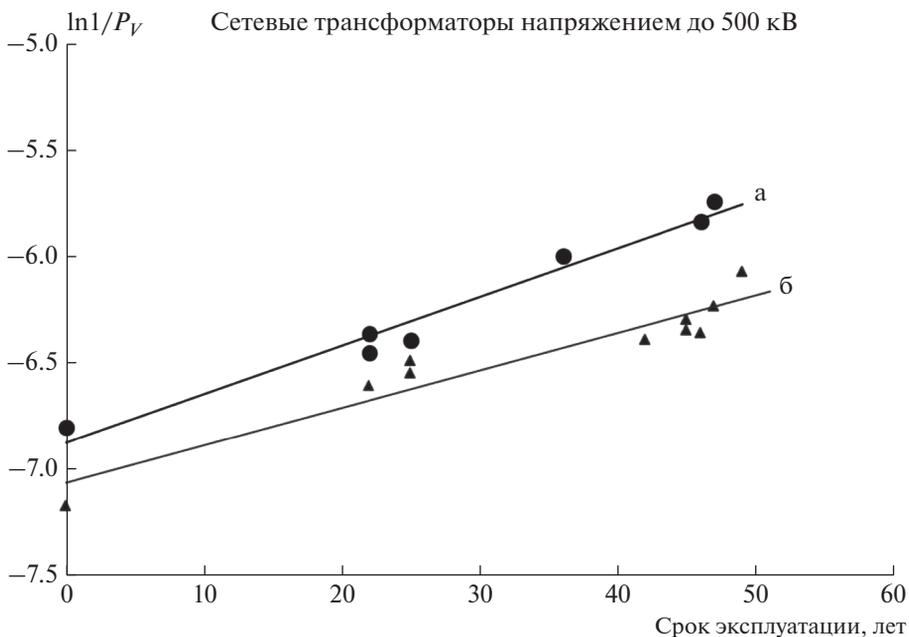


Рис. 2. Полулогарифмические анаморфозы обратных значений степени полимеризации витковой изоляции сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ при среднем значении степени полимеризации исходной электроизоляционной бумаги 900 ± 50 (а) и 1300 ± 50 (б).

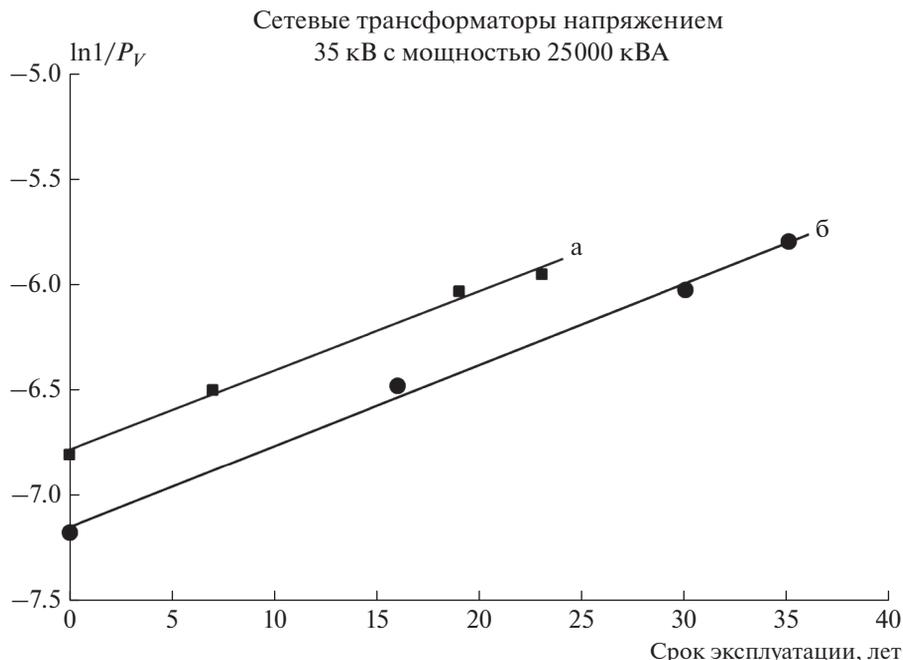


Рис. 3. Полулогарифмические анаморфозы обратных значений степени полимеризации витковой изоляции сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ, мощностью 25000 кВА при среднем значении степени полимеризации исходной электроизоляционной бумаги 900 ± 50 (а) и 1300 ± 50 (б).

мощностью 25000 кВА). При этом скорость деструкции витковой изоляции сетевых трансформаторов, за исключением агрегатов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА, существенно ниже, чем скорость деструкции витковой изоляции блочных трансформаторов. Это различие определяет существенно больший общий срок службы сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ (табл. 4).

Отметим, что значения констант скорости деструкции витковой изоляции обмоток трансформаторов, указанные в табл. 4, отличаются от значений, приведенных в [6, 7, 11],

Таблица 4. Характеристики процесса деструкции витковой изоляции обмоток различных типов силовых трансформаторов для прогнозирования срока их службы

Тип нагрузки трансформаторов	Среднее значение степени полимеризации исходной электроизоляционной бумаги, P_{i0} , ед.	Константа скорости деструкции изоляции по полулогарифмической анаморфозе (уравнение 1)	Квадрат коэффициента корреляции	Прогнозируемый общий срок службы витковой изоляции трансформаторов, лет (уравнение 2)
Блочные напряжением 110–500 кВ	1300 ± 50	0.04218 ± 0.00377	0.926	39
	900 ± 50	0.04199 ± 0.00412	0.954	30.5
Сетевые с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ и мощностью 25000 кВА	1300 ± 50	0.03807 ± 0.00162	>0.99	43
	900 ± 50	0.03757 ± 0.00222	>0.99	34
Сетевые напряжением до 500 кВ	1300 ± 50	0.01757 ± 0.00204	0.903	95
	900 ± 50	0.02268 ± 0.00181	0.969	59

на 7–23%. Это весьма существенный момент, связанный с увеличением массива данных значений показателя степени полимеризации витковой изоляции обмоток силовых трансформаторов, для определения общего и остаточного срока службы витковой изоляции обмоток и трансформатора в целом. При этом квадраты коэффициентов корреляции полулогарифмических анаморфоз, описывающих процесс деструкции витковой изоляции обмоток силовых трансформаторов, лежат в пределах от 0.903 до >0.99.

Полученные данные указывают на то, что глубина деструкции витковой изоляции обмоток отечественных силовых трансформаторов, оборудованных фильтрами непрерывной очистки масла, на 91–99% определяется величиной нагрузки и исходной степенью полимеризации намоточной электроизоляционной бумаги, использованной для витковой изоляции обмоток при изготовлении силового трансформатора. Доля влияния всех остальных факторов на деструкцию витковой изоляции обмоток силовых трансформаторов составляет от 1 до 9% [18].

Анализ повреждаемости блочных трансформаторов ТЭС мощностью 63 МВА и более со сроком эксплуатации свыше 25 лет показывает, что примерно 45% общего числа повреждений (без учета повреждений высоковольтных вводов и устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН)), сопровождавшихся внутренними короткими замыканиями, связано с возникновением витковых замыканий при значительном износе изоляции [3]. При этом после 37 лет эксплуатации блочных трансформаторов происходит относительно резкое нарастание удельной повреждаемости, связанное с проявлением факторов старения оборудования. В среднем срок службы витковой изоляции блочных трансформаторов и автотрансформаторов ТЭС напряжением 110–500 кВ составляет 33 года [11]. Это находится в согласии с данными табл. 4, в которой прогнозируемый общий срок службы витковой изоляции блочных трансформаторов в зависимости от исходной степени полимеризации и константы скорости деструкции изоляции определен интервалом 30.5–39 лет.

В процессе эксплуатации деструкция витковой изоляции обмоток трансформаторов промышленных предприятий происходит по аналогичным механизмам, наблюдаемым для блочных трансформаторов. Так, для сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА прогнозируемый общий срок службы витковой изоляции в зависимости от исходной степени полимеризации и константы скорости деструкции изоляции определен интервалом 34–43 года.

Иная картина наблюдается для сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ. Согласно данным табл. 4 прогнозируемый общий срок службы витковой изоляции обмоток этих трансформаторов в зависимости от исходной степени полимеризации и константы скорости деструкции изоляции определяется интервалом 59–95 (в среднем, 77) лет. Это, как мы отмечали ранее [11], существенно и практически более чем в 2 раза превышает расчетный срок службы витковой изоляции блочных трансформаторов. В силу этого проблема старения изоляции крупных сетевых трансформаторов является несколько отложенной.

ВЫВОДЫ

1. Существенно расширен массив данных значений показателя степени полимеризации витковой изоляции обмоток эксплуатируемых блочных и сетевых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, а также трансформаторов промышленных предприятий напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА.

2. Установлены пригодные для прогнозирования остаточного срока службы различных по нагрузке типов силовых трансформаторов значения “годовых” кинетических констант скорости деструкции витковой целлюлозной изоляции обмоток трансформаторов.

3. Разработана методология и проведено прогнозирование общего срока службы витковой изоляции обмоток силовых трансформаторов с различной нагрузкой.

4. Согласно результатам проведенных исследований прогнозируемый общий срок службы изоляции обмоток силовых трансформаторов, определяющий срок службы трансформатора, в среднем составляет:

- для блочных трансформаторов напряжением 110–500 кВ – 35 лет;
- для сетевых трансформаторов с промышленной нагрузкой напряжением 35 кВ с мощностью 25000 кВА – 38.5 лет;
- для сетевых трансформаторов напряжением до 500 кВ – 77 лет.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с известными данными по повреждаемости силовых трансформаторов [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головищikov В.О. Готова ли электроэнергетика России к переходу на новую технологическую платформу, основанную на массовой цифровизации? // Энергетик. 2018. № 11. С. 3–6.
2. Романов Е.В. МНТК-2012: взгляд в будущее // Росэнергоатом. 2012. № 6. С. 3–7.
3. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электричество. 2010. № 2. С. 2–7.
4. Lvov M. Yu., Chichinsky M.I., Lvov Yu.N., Ershov B.G., Komarov V.B. Rate indices for evaluating the winding insulation wear of power transformers // Power technology and engineering, September 2002, V. 36. № 5. P. 280–284.
5. Львова М.М., Комаров В.Б., Лютыко Е.О., Бондарева В.Н., Селиверстов А.Ф., Широкова И.Б., Быков Г.Л., Кулюхин С.А., Ершов Б.Г., Рубцов А.В. Физико-химические аспекты эффективности применения фильтров непрерывной очистки масел силового трансформаторного оборудования // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. № 3. С. 47–52.
6. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Комаров В.Б., Бондарева В.Н., Селиверстов А.Ф., Ершов Б.Г., Рубцов А.В. Старение целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов в процессе эксплуатации // Электрические станции. 2004. № 10. С. 26–29.
7. Ершов Б.Г., Бондарева В.Н., Комаров В.Б., Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Рубцов А.В. Влияние нагрузки на кинетику старения изоляции обмоток силовых трансформаторов, эксплуатируемых в России // Сборник научных трудов пятой Международной научно-технической конференции “Электрическая изоляция – 2010”, 1–4 июня 2010 г., С. 187–188.
8. Ершов Б.Г., Комаров В.Б., Лютыко Е.О. Измерения степени полимеризации бумажной изоляции силового оборудования в электроэнергетике и электроэнергетической промышленности // Сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции “Измерения в современном мире – 2013”, 3–5 июня 2013 г., С. 21–24.
9. Lvova M. M., Lvov S. Yu., Komarov V.B., Lyut'ko E. O., Vdoviko V.P., Demchenko V.V., Belyaev S.G., Savel'ev V.A., Lvov M. Yu., and Lvov Yu.N. Reducing the risk of damage to power transformers of 110 KV and above accompanying internal short circuits // Power Technology and Engineering: V. 48. № 6. March 2015. P. 484–490.
10. Комаров В.Б., Львов Ю.Н., Львов М.Ю., Хазиахметов Р.М., Ершов Б.Г. Методологические аспекты, определяющие предельное состояние силовых трансформаторов // Энергетик. 2016. № 8. С. 25–26.
11. Майоров А.В., Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Комаров В.Б., Ершов Б.Г. Прогнозирование срока службы силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей // Энергетик. 2018. № 11. С. 17–20.
12. Львов М.Ю., Бондарева В.Н., Комаров В.Б., Селиверстов А.Ф., Ершов Б.Г., Лютыко Е.О., Львов Ю.Н., Рубцов А.В., Новиков Е.А. Определение степени полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Электрические станции. 2008. № 8. С. 49–52.
13. Львов М.Ю., Медведев Ю.И., Львов Ю.Н., Ланкау Я.В., Комаров В.Б., Ершов Б.Г., Селиверстов А.Ф., Бондарева В.Н. Методические указания по оценке состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по степени полимеризации. М.: ЗАО “Энергетические технологии”, 2008. 20 с.
14. Ершов Б.Г., Кассихин С.Д., Климашевский И.П., Комаров В.Б., Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Селиверстов А.Ф., Сипилин К.Г., Славинский А.З., Столяров П.Н. Разработка научных основ синтеза композиций и технологии изготовления изоляции типа RIP для высоковольтных вводов // Материалы 8 Международного симпозиума “Электротехника 2010. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии”, Московская обл., ассоциация “ТРАВЭК”, 2005, доклад 6.06 (CD-ROM, 7 с.).

15. Kawamura T., Fushimi Y., Shimato T., Amano N., Ebisawa Y., Hosokawa N. Improvement in maintenance and inspection and pursuit of economical effectiveness of transformers in Japan // CIGRE–2002, 12–107.
16. L'vov M.Yu., Antipov K.M., L'vov Yu.N., Mamikonyants L.G., Komarov V.B., Tsurpal S.V., Shifrin L.N., and Dement'ev Yu.A. An estimate of the limit state of power transformers and autotransformers // Power Technology and Engineering: V. 42. № 2. 2008. P. 113–118.
17. Komarov V.B., L'vov M.Yu., L'vov Yu.N., Ershov B.G., Bondareva V.N., Rubtsov A.V., Seliverstov A.F. Regeneration of cellulose insulation of windings of long-life power transformers // Power Technology and Engineering. V. 38. № 3. 2004. P. 178–181.
18. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М.: “Мир”, 1976. 541 с.

Kinetic Approach to Estimation of Residual Service Life of Cellulose Coil Insulation of Windings of Power Transformers in Operation and Forecasting of Their Service Life

**V. B. Komarov^{a, *}, S. A. Kulyukhin^a, A. F. Seliverstov^a, V. N. Bondareva^a, J. O. Zakharova^a,
E. O. Lyut'ko^b, Yu. N. L'vov^b, and M. Yu. L'vov^c**

^a*The Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS), Moscow, Russia*

^b*“Research and Development Center at Federal Grid Company of Unified Energy System”,
Joint-stock Company (“R&D Center FGC UES”, JSC), Moscow, Russia*

^c*Joint-stock Company “United Energy Company”, Moscow, Russia*

**e-mail: komvb@mail.ru*

An array of experimental values of the medium viscosity degree of polymerization of cellulose insulation of windings of power transformers of different types with different loads is presented. It is shown that the dependence of the inverse values of the degree of polymerization of the winding insulation on the operating time for all types of transformers produced and operated in Russia are satisfactorily approximated by semi-logarithmic anamorphoses. The correlation analysis of semi-logarithmic anamorphoses of the inverse values of the degree of polymerization of the winding insulation from the operating time for different loads of power transformers is carried out. The “annual” rate constants of winding insulation destruction for block (voltage 110 kV and above) and network (voltage up to 500 kV) transformers, as well as for network transformers with industrial load voltage of 35 kV and power of 25000 kVA, suitable for calculating the residual service life of winding insulation and the transformer as a whole, are established. It is shown that the depth of destruction of domestic power transformers equipped with continuous oil purification filters is 91–99% determined by the load and the initial degree of polymerization of the winding insulating paper used for winding insulation in the manufacture of a power transformer. The share of influence of all other factors on destruction of turn isolation of windings of power transformers makes from 1 to 9%. Depending on the initial degree of polymerization of the insulating paper and the load of transformers, the intervals of the total service life of the coil insulation of power transformers are calculated. The results obtained are in good agreement with the known data on the damage of power transformers.

Keywords: power transformer, cellulose coil insulation of windings, destruction, kinetics, residual service life, prediction