

ОЦЕНКИ ВЫРАБОТАННОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Васин В.П., докт. техн. наук, проф.
Долин А.П., канд. техн. наук

Рассматривается процесс старения бумажной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов. С помощью предложенной ранее обобщенной формулы Монтзингера по данным мониторинга работы трансформаторного оборудования России проанализировано влияние роста влагосодержания твердой изоляции, кислотного числа масла и концентрации кислорода, растворенного в масле бака трансформатора, на износ бумажной изоляции.

Показано, что собственно термический износ изоляции очень невелик, но увлажнение бумажной изоляции в реальных пределах (до 3%) при повышении кислотного числа масла (примерно в 2 раза до 0,2 мг/г КОН) и содержания кислорода в нем приводит к возрастанию скорости старения и износа изоляции в десятки раз. Суммарный износ от всех факторов оказывается значительным, хотя сильно меняется для разных сочетаний условий протекания физико-химических процессов и температурных режимов. Формулируются вытекающие из этого требования к системам мониторинга силовых трансформаторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а : силовой маслонаполненный трансформатор; бумажная изоляция; износ изоляции; остаточный ресурс; обобщение формулы Монтзингера; требования к системам мониторинга трансформатора

Актуальность создания полноценной методологической основы для расчетов и прогнозирования расходования ресурса трансформаторного оборудования (далее трансформаторов) обусловлена острой проблемой замены значительного числа трансформаторов, которая назрела в ЕЭС России в силу ее жизненного цикла. Поэтому объективное обоснование выбора очередности и временной последовательности такого переоснащения имеет большое практическое значение.

Расчеты исчерпания ресурса изоляции рассмотрены в справочниках, учебниках, статьях, монографиях, руководящих документах [1-5], где даны примеры их применения. Наиболее полно приводятся данные по расчету ресурса трансформаторного оборудования в справочной книге «Силовые трансформаторы» [1]. Однако практическое использование указанных разработок вызывает существенные затруднения.

Изложенные методики связаны с необходимостью определения степени полимеризации бумажной изоляции, что весьма не просто, а в большинстве случаев нереально. По предложению СИГРЭ ресурс вычисляется по формуле [1]

$$\text{ресурс} = \left(\frac{1}{200} - \frac{1}{\text{СП}_0} \right) \frac{\exp[13350/(v+273)]}{8760 A}, \quad (1)$$

где СП_0 — степень полимеризации целлюлозной изоляции на начало рассматриваемого промежутка времени, v — температура наиболее нагретой точки изоляции; A — показатель скорости старения, зависящий от влагосодержания твердой изоляции w_T , кислотного числа масла $K_{к.ч}$ и содержания кислорода, растворенного в масле C_{O_2} .

При этом, как видно из приведенной формулы, приходится считать постоянными температуру обмотки, влагосодержание изоляции и уровень окислительных процессов (в том числе кислотное число масла). В отдельных публикациях предлагается брать частичные интервалы, на которых эти параметры постоянны, а затем суммировать результаты в абсолютных единицах. Как быть при этом со значениями СП на каждом частичном интервале, которые от интервала к интервалу меняются, рекомендации нет. Не решена также проблема и с прогнозированием процессов $w_T(t)$, $K_{к.ч}(t)$, $C_{O_2}(t)$, значения которых необходимы для определения показателя A в формуле (1).

В НТЦ «Электроинжиниринг, диагностика и сервис» (НТЦ «ЭДС») разрабатывается аналитическая методика расчета износа изоляции по данным температурных показателей, влагосодержания твердой изоляции, кислотного числа масла в баке трансформатора и концентрации кислорода, растворенного в масле. Необходимость учета влагосодержания изоляции, окисления масла и наличия кислорода в масле бака установлена давно. Известно, что в кислом растворе целлюлоза может быть полностью разложена на глюкозу при достаточно высокой концентрации кислоты в сроки порядка суток. Наличие кислорода необходимо для деструкции целлюлозы, без которого она устойчива к деградации до температур 120–150 °С.

Увеличение влагосодержания приводит к повышению скорости деполимеризации бумажной изоляции в десятки раз. При этом все эти факторы непрерывно изменяются в процессе эксплуатации, и потому необходим тщательный учет динамики процесса.

Наиболее простой способ описания динамики износа изоляции дает формула Монтзингера [1]. Относительный износ изоляции L на интервале времени $(t_0, t_0 + T)$ определяется выражением

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt, \quad (2)$$

где θ_h — температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, а Δ принимают равной 6 °С (документ IEC 60076-7) и 7 °С Россия [1].

Авторами предложено уточнение этой формулы [2, 3] для учета указанных выше факторов, которое бесспорно для учета влагосодержания твердой изоляции, так как в справочной литературе приведены подробные данные об ускорении процесса старения в зависимости от w_T . Суть уточнения состоит в том, что скорость старения, входящая под знак интеграла (2), должна быть повышена умножением на множитель V_w

$$V_w = 1, \text{ если } w_T < w_{\text{баз}}; \\ V_w = (w/w_{\text{баз}})^\alpha, \text{ если } w > w_{\text{баз}}, \quad (3)$$

где $w_{\text{баз}}$ — базовое значение влагосодержания твердой изоляции, принимаемое равным 0,3% или несколько выше; α — показатель степени, определенный в [2, 3].

Предложенная формула весьма точно отражает существующие экспериментальные данные. Соответственно, интеграл для относительного износа изоляции (2) следует скорректировать умножением подинтегральной функции (относительной скорости теплового старения изоляции) на V_w

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} V_w \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt = \\ = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} (w/0,3)^{1,493} \cdot \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt. \quad (4)$$

Или

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} (w/w_{\text{баз}})^{1,493} \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta] dt. \quad (5)$$

Так, при $w = 1\%$ подинтегральная функция увеличивается в 6 раз в полном соответствии с данными [1]. Отечественные нормативы допускают увлажнение бумажной изоляции до 4%. Если подставить в (5) это значение, то получим, что износ возрастает при таком увлажнении бумаги в 47,8 раз.

Учет окисления масла сложнее, но и здесь есть достаточно надежный экспериментальный базис. В [1] приведены значения коэффициентов старения в зависимости от окисления масла и содержания в нем кислорода. Так, в окисленном масле скорость старения целлюлозной изоляции возрастает в 1,5-1,6 раз (высшее

значение соответствует температуре 100-110 °С). В литературе, посвященной переработке целлюлозы, есть и более высокие оценки. А повышение содержания кислорода приводит к возрастанию скорости старения в 3,5-3,75 раза (высшее значение соответствует 100 °С).

Прежде всего, надо отметить, что диапазон рекомендуемых значений невелик (2-6%) и может быть уменьшен на основе учета реального графика изменения температуры (он, как будет показано ниже, тоже невелик).

Для математического описания повышения скорости старения этих двух факторов принимается (в порядке первого приближения), что скорость старения их зависит от кислотного числа ($K_{к.ч}$) и концентрации кислорода (C_{O_2}). Зависимости эти имеют вид, аналогичный полученному для учета w

$$V_{к.ч} = (K_{к.ч}/K_{\text{баз}})^\beta; \quad (6)$$

$$V_{O_2} = (C_{O_2}/C_{O_2,б})^\gamma. \quad (7)$$

При этом, в качестве первого приближения можно принять $K_{\text{баз}} = 0,1$ мг/г КОН и $\beta = 2,05$ [3]. Вместе с тем есть возможность количественно определить, насколько возрастает скорость старения при повышении кислотности масла, сопоставляя значения коэффициента старения k во втором и третьем столбцах таблицы 22.2 [1] при одинаковых температурах. Сопоставление показывает, что скорость старения возрастает примерно в 1,5-1,6 раза (для разных температур).

Аналогично получаем, что увеличение содержания кислорода до предельного значения приводит к возрастанию скорости старения целлюлозы в 3,5-3,7 раза для разных температур. Эти соотношения приводят к следующей модификации формулы Монтзингера

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} V(\theta, w, K, C_{O_2}) dt, \quad (8)$$

где

$$V = \exp [\ln 2 \cdot (\theta_h - 98) / \Delta + \alpha \ln (w/w_{\text{баз}})^* + \beta (K_{к.ч}/K_{\text{баз}})^* + \gamma \cdot \ln (C_{O_2}/C_{O_2,баз})^*]. \quad (9)$$

Основную часть в показателе дает температурная разность $(\theta_h - 98)$, соответствующая формуле Монтзингера. Второе слагаемое в показателе отражает влияние влагосодержания бумажной изоляции, третье — окисления масла, а четвертое — влияние кислорода по повышению скорости деполимеризации. В этой формуле звездочка означает, что, если отношение, стоящее в скобках, меньше 1, то его надо брать равным 1. Это правило учитывает, что при значениях параметров, меньше базовых, увеличивать скорость старения изоляции не следует.

Для применения этой формулы необходимо получить данные об изменении во времени величин $w(t)$, $K(t)$, $C_{O_2}(t)$.

Поскольку физический эксперимент поставить затруднительно, проведем численный анализ, с помощью которого исследуем степень влияния рассматриваемых факторов на старение трансформаторного оборудования. При этом не используются приведенные

аппроксимации, а в расчеты вводятся значения V_w, V_k, V_{O_2} как функции времени, возрастающие с увеличением продолжительности эксплуатации трансформатора. Зависимости температуры ННТ $\theta_n(t)$ принимаются по данным мониторинга российских автотрансформаторов 500 кВ. Температурный график для каждого года будем считать одинаковым и возьмем его из мониторинга одного из трансформаторов 500 кВ. На рис. 1-3 показаны графики изменения температуры наиболее нагретой точки, полученные по результатам мониторинга автотрансформатора АДЦ-167000 кВА 500 кВ за один год. Нагрузка автотрансформатора за этот период изменялась от $0,3S_{НОМ}$ до $0,8S_{НОМ}$.

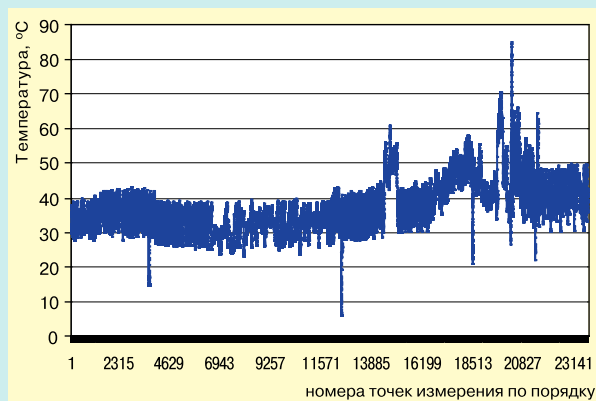


Рис. 1. Данные мониторинга температуры ННТ автотрансформатора АДЦ-1 500 кВ фаза С за 2007 г.

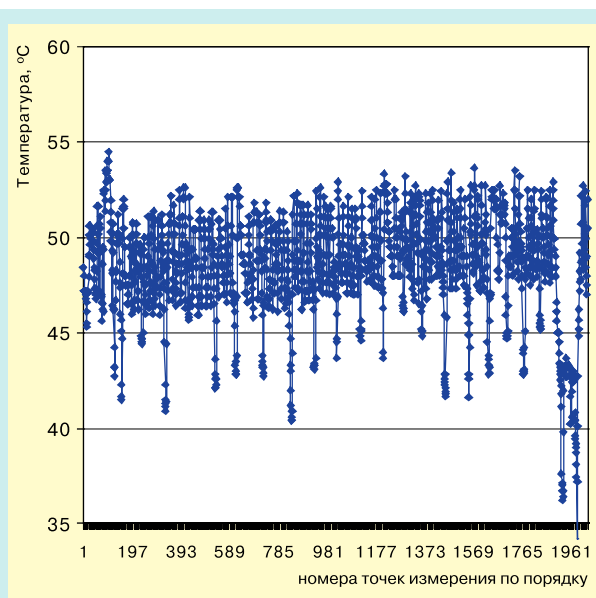


Рис. 2. Данные мониторинга ННТ автотрансформатора 500 кВ за один месяц — октябрь 2007 г.

В силу необходимости сжатия график получился в виде сжатой полосы. Размах колебаний в основном равен 10°C . Более детально графики показаны на рис. 2 и 3.

По этим графикам по формуле Монтзингера (интегрирование по формуле трапеций) определялся

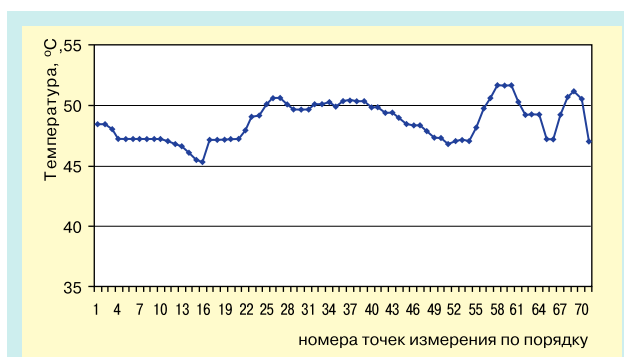


Рис. 3. Данные мониторинга ННТ за один день 1 октября 2007 г.

термический износ за год, который оказался равным $0,0034$.

Надо отметить, что значение это мало, то есть собственно тепловой износ практически можно не учитывать — это несколько суток за год. Расчеты для других трансформаторов класса 500 кВ дают значения такого же порядка, в редких случаях достигающих значения $0,012$. Расчеты для шунтирующих реакторов дают значения относительного износа за год, превышающие 10^{-2} , но не более $0,025$. Нами было рассмотрено 11 трансформаторов и реакторов (500 кВ), поэтому не исключено, что указанные пределы будут при дальнейшем анализе расширены.

Физически малые значения термического износа изоляции вполне объясняются тем, что за весь год температура ННТ не превышала 70°C (был один кратковременный выброс до 85°C , он отчетливо виден на рис. 1).

Учет влияния увлажнения бумажной изоляции и окисления масла производился следующим образом. Вычисление аппроксимирующих коэффициентов обойдем, а непосредственно зададимся ростом функций

$$\begin{aligned} \exp[\alpha \ln(w/w_{\text{баз}})] &= V_w(t), \\ \exp[\beta \ln(k/k_{\text{баз}})] &= V_k(t), \\ \exp[\gamma \ln(c_{O_2}/c_{O_2\text{баз}})] &= V_{O_2}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

в явном виде при изменении времени от 0 до 20 лет.

Пределы возрастания функций V принимаются в соответствии с рис. 19.17 (для w) и табл. 22.2 [1], а темп изменения, который в каждом конкретном случае может существенно различаться, варьируется.

На рис. 4 показан процесс, принятый за базовый. На рис. 5 показаны четыре процесса для изменения во времени влагосодержания твердой изоляции, среди них содержится и базовый процесс. Также рассматривались два варианта роста кислотного числа с возрастанием относительной скорости старения V_k (на рис. 6 показаны первый — базовый, второй — ускоренный).

Итак, для температурного износа, соответствующего представленным на рис. 1-3 графикам, рассматривались 8 процессов.

Первый вариант — возрастание влагосодержания бумажной изоляции в соответствии с серией 1 рис. 5 при базовом варианте изменения содержания кислорода

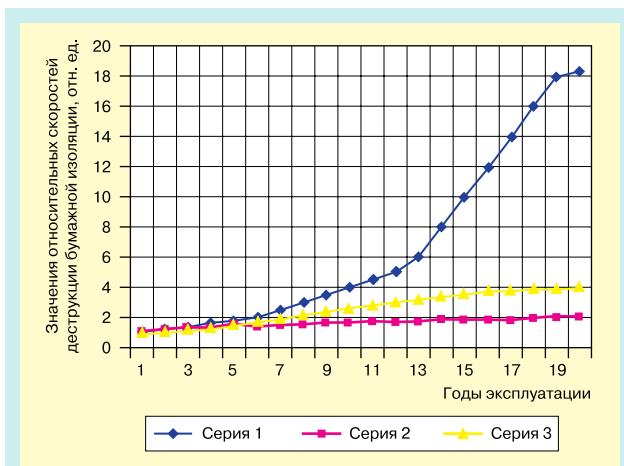


Рис. 4. Базовый вариант процесса изменения в процессе эксплуатации влагосодержания твердой изоляции, кислотного числа и концентрации кислорода: серия 1 — зависимость $V_w(t)$; серия 2 — $V_K(t)$; серия 3 — $V_{O_2}(t)$

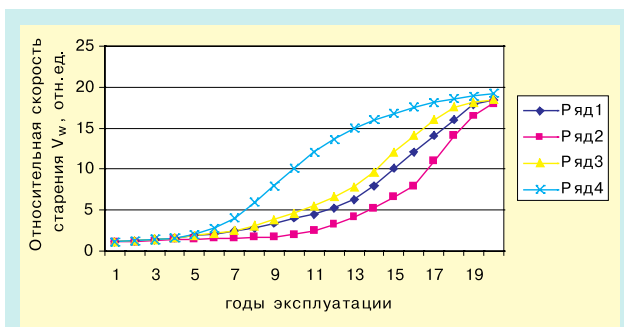


Рис. 5. Кривые роста скорости старения от увеличения влагосодержания твердой изоляции

Потолок нарастания соответствует влагосодержанию бумажной изоляции 2,1%, что соответствует [2, 3] скорости $V_w = (2,1/0,3) 1,493 = 18,3$ отн. ед./сут.

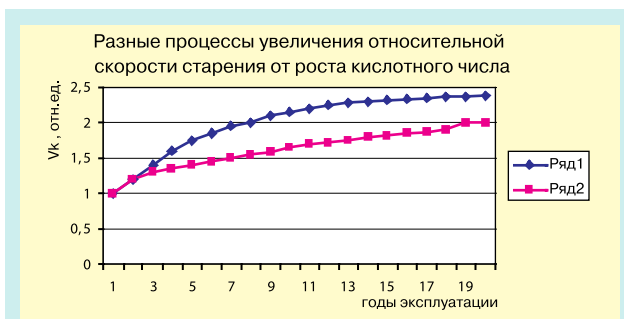


Рис. 6. Варианты процессов изменения относительной скорости старения от окисления масла

и базовом варианте изменения кислотного числа $K_{к,ч}$ (ряд 2 на рис.6). Второй вариант — возрастание влагосодержания бумажной изоляции в соответствии с серией 2 (см. рис. 5) рост кислотного числа по базовой кривой, рост содержания кислорода по кривой 2 (см. рис. 6). Третий вариант отличался от предыдущих тем, что рост влагосодержания протекал по зависимости 3, а 4 — по зависимости 4. Во всех четырех предыдущих

вариантах рост кислотного числа соответствовал ряду 2 (см. рис. 6).

Варианты 5-8 отличались от предыдущих тем, что возрастание кислотного числа в них происходило в соответствии с рядом 1 (см. рис. 6).

Для разных процессов интегрирование скорости износа с учетом V_w, V_k, V_{O_2} дало следующие результаты износа изоляции за 20 лет

износ ресурса для первого варианта оказался равным 2,9 лет;

для второго — 2,2 года;

для третьего — 3,4 года;

для четвертого варианта — 4,2 года.

Для сочетания четвертого варианта для V_w и второго для V_k износ изоляции составил за 20 лет 5,4 лет.

Остаточный ресурс может быть определен как разность между нормативным ресурсом (25 лет) и полученным износом. Для базового варианта остаточный ресурс после 20 лет работы оказался равным 22,1 года; для второго варианта — 22,8 года; для третьего — 21,6 года. Наименьший ресурс получен равным 19,6 лет.

Однако эти значения имеют условный характер, поскольку дальнейшая эксплуатация имеет большую неопределенность, так как на трансформаторе после достижения предельных значений w, K и C_{O_2} следует провести дегазацию масла, его регенерацию, а также сушку изоляции. После этого процесс износа изоляции станет другой, и это требует методов расчета, учитывающих качество профилактических мероприятий.

Из проведенных расчетов следует, что получаемые значения израсходованного ресурса (около 5 лет) после 20-летней эксплуатации оказались довольно малы. Это объясняется тем, что температура ННТ обмотки низкая. Например, если уровень значений θ повысить одновременно на 7°C, то все приведенные оценки возрастут в 2 раза, то есть израсходованный ресурс для наиболее неблагоприятного случая достигнет значения 10 лет.

Для рассмотрения дальнейшей эксплуатации следует учесть, что необходимо принять следующие меры: провести дегазацию масла, чтобы удалить растворенный в нем кислород; провести регенерацию масла, чтобы устранить активирующее действие кислот на деструкцию изоляции; высушить изоляцию. Тогда состояние трансформатора вернется относительно старения к началу процесса, но все равно трансформатор будет уже не новым, а реставрированным.

Если не предпринять указанных мероприятий, процесс деградации изоляции будет происходить уже при очень неблагоприятных условиях: при большом увлажнении бумаги, большом содержании кислот и кислорода в масле, то есть процесс расходования ресурса будет существенно отличаться от процесса деградации в течение первых 20 лет.

Поэтому прогноз остаточного ресурса должен учитывать не только изменение нагрузок, но и проведение профилактических мероприятий.

Поэтому, по нашему мнению, следует нормировать не остаточный ресурс, а допустимый уровень сработанного ресурса.

Вместе с тем, результаты расчета показывают высокую устойчивость оценки сработанного ресурса. Это объясняется тем, что интегрирование, имеющее место при расчете износа изоляции, дает сглаживающий эффект.

ВЫВОДЫ

1. Анализ опытных данных и расчеты по результатам мониторинга показывают, что учет увлажнения бумаги и окисления масла приводит к увеличению скорости старения изоляции в десятки раз.

2. Учет этих факторов возможен в формуле Монтзингера при численном интегрировании произведения четырех относительных скоростей старения: теплового, при увлажнении изоляции, при окислении масла и росте концентрации кислорода, растворенного в масле бака трансформатора.

3. Выражение для повышения относительной скорости старения из-за увлажнения получены по экспериментальным данным и не вызывают сомнений в обоснованности. Выражение для повышения относительной скорости старения из-за окисления масла вследствие отсутствия числовых данных были получены качественно с сохранением порядка влияния также на основе экспериментальных данных. Целесообразны опытные проработки для получения более корректных данных.

4. Расчеты реальных записей мониторинга трансформаторов и реакторов 500 кВ показывают, что термическое старение за год составляет не более 0,01 года в силу того, что температура ННТ обмоток значительное время не превышает 50 °С, а повышенные нагревы кратковременны. В этих условиях основной вклад в деградацию изоляции вносит гидролиз и окисление.

5. Для сетевых трансформаторов класса 500 кВ за срок эксплуатации порядка 20 лет расчетный расход ресурса в ординарных условиях не превосходит 5 лет и, соответственно, относительный износ не более 25%.

6. Для шунтирующих реакторов 500 кВ расход ресурса выше, чем для автотрансформаторов, потому что температура ННТ в них нередко достигает 90 °С.

7. Проведенный анализ показывает, что главное значение для обеспечения сохранности твердой изоляции имеет контроль ее влагосодержания, наличия растворимых кислот в масле и повышенной концентрации кислорода в нем. Эти параметры следует точно контролировать в создаваемых системах мониторинга.

8. Для оценки выработанного ресурса трансформаторов и шунтирующих реакторов системами мониторинга следует учитывать влагосодержание бумажной изоляции, кислотное число трансформаторного масла и содержание в нем кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции маслонаполненных трансформаторов. — ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2008, № 3.
3. Васин В.П., Долин А. П. К задаче оценки остаточного ресурса силовых маслонаполненных трансформаторов. — Новое в российской электроэнергетике, 2008, № 3.
4. Львов Е.В. Опыт мониторинга состояния изоляции силового трансформаторного оборудования. — Энергоэксперт, 2009, № 1.

Васин Владислав Петрович — профессор, главный специалист ООО «НТЦ «Электроинжиниринг, диагностика, сервис» 8(495) 129-82-71 vpvasin@rambler.ru

Долин Анисим Петрович — начальник Отдела диагностики Департамента текущего планирования технического обслуживания, ремонтов и диагностики оборудования ОАО «ФСК ЕЭС» 8(495) 710-91-70 dolin-ap@rao.elektra.ru

Подписку на журнал

ЭЛЕКТРО

электротехника, электроэнергетика,
электротехническая промышленность

можно оформить в любом отделении связи
Подписной индекс по каталогу
Агентства «РОСПЕЧАТЬ»

80832