

УДК 621.315:615.23

*Д.В. Кизеветтер, А.Ю. Савина,
Н.М. Журавлева, А.В. Воробьев*

К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*D.V. Kiesewetter, A.Yu. Savina
N.M. Zhuravleva, A.V. Vorobyev*

ON THE DIAGNOSTICS OF TRANSFORMER OIL IN SERVICE

Рассматриваются возможности дать более полную количественную оценку наличия механических частиц и шлама в электроизоляционных жидкостях: метод, основанный на рассеянии излучения частицами, а также впервые предложенный авторами работы метод регистрации быстродвижущихся частиц в нефтяном масле при его освещении некогерентным светом.

ШЛАМ. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ЖИДКОСТЬ. БЫСТРОДВИЖУЩИЕСЯ ЧАСТИЦЫ.

Methods allow to provide a more complete quantification of the presence of mechanical particles and sludge in insulating liquids are discussed: the method based on the scattering of light by particles, as well as first proposed by the authors the method of recording fast-moving particles in the oil when the oil is illuminated by incoherent light.

SLUDGE. INSULATING LIQUID. FAST-MOVING PARTICLES.

Общепризнано, что силовые трансформаторы (СТ) — наиболее ответственные и дорогостоящие элементы в системе производства, передачи и распределения электрической энергии, потребление которой в России неуклонно растет, что влечет за собой увеличение спроса на СТ. Не менее важен и тот факт, что электротехническое и энергетическое оборудование в нашей стране в значительной мере устарело и изношено, вследствие чего для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией оно нуждается в модернизации, ремонте и замене. Статистически подтверждено, что срок службы СТ (основным видом изоляции которых остается не имеющая конкурентоспособных альтернатив бумажно-пропитанная композиция) напрямую и в первую очередь зависит от электрофизических свойств целлюлозной бумаги (ЦБ) и жидкого диэлектрика [1]. Поэтому разработка мер по повышению работоспособности силовых трансформаторов является комплексной задачей, а диагностика состояния

компонентов бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) в процессе эксплуатации представляется актуальным и необходимым элементом профилактики аварий и надежного обеспечения энергобезопасности страны.

Как известно, ресурс БПИ силового трансформатора обусловлен состоянием электроизоляционной бумаги (ЭИБ): масло можно слить, регенерировать или заменить, в то время как в целлюлозном материале в процессе эксплуатации происходят морфологические изменения на молекулярном уровне, что влечет за собой, в частности, падение его механической прочности (особо опасное при режимах короткого замыкания СТ). Однако электрическая прочность ЭИБ при этом практически не меняется [2]. Длительное термовоздействие не приводит к росту величины ее тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) и изменению иных диэлектрических характеристик [3].

В то же время вследствие термоокислительных процессов и электрического старения электриче-

ская прочность жидкого диэлектрика постепенно снижается, а $\text{tg}\delta$ существенно возрастает. Иными словами, именно деструкция трансформаторного масла приводит к увеличению $\text{tg}\delta$ БПИ и, как следствие, к дальнейшему развитию процессов разрушения ее компонентов, что влечет за собой снижение химических и механических характеристик целлюлозного диэлектрика, электроизоляционных свойств пропитывающей среды, а также работоспособности трансформатора в целом. Поэтому трансформаторное масло — наиболее уязвимый компонент рассматриваемой изоляционной композиции. Вопрос о выборе критериальной характеристики, указывающей на необходимость его своевременной замены, давно и широко обсуждается. Однако единого мнения на этот счет до сих пор не выработано.

Хорошо известно, что по мере старения в масле накапливается шлам, который, осаждаваясь на изоляции, ухудшает ее диэлектрические свойства, а также может быть причиной неравномерного распределения температуры на поверхности высоковольтного ввода [2, 4]. Поэтому в ряде случаев для удаления шлама, накопленного в силовом трансформаторе, применяют отмывку целлюлозной изоляции нефтяными маслами или органическими моющими средствами. Но, как показано в [5], регенерация бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов указанным способом может привести к ее разрушению и вымыванию отдельных компонентов целлюлозного материала, а также способствовать повышению риска механических повреждений при дальнейшей эксплуатации. Следовательно, формирование шлама (что является дополнительным негативным фактором, снижающим работоспособность СТ) для предотвращения его накопления в опасном количестве требует периодического контроля состояния электроизоляционной жидкости. Однако на сегодняшний день существуют лишь косвенные методы определения качества трансформаторных масел: по пробивному напряжению, кислотному числу, тангенсу угла диэлектрических потерь, цвету, прозрачности и др.

При проведении периодических испытаний трансформаторного масла содержание механических примесей (согласно ГОСТ 6370–83) оценивается в процентах весовым методом. Суш-

ность метода заключается в фильтровании испытуемого трансформаторного масла с предварительным растворением медленно фильтрующихся продуктов, промывании осадка на фильтре растворителем с последующим высушиванием и взвешиванием. Класс промышленной чистоты масла определяют в соответствии с ГОСТ 17216–2001. Согласно нормам РД 34.45–51.300–97 для заливки в новое электрооборудование требуемое значение параметра при рабочих напряжениях 220–750 кВ — это 9-й класс чистоты до заливки в трансформатор и 10-й — после заливки. Максимально допустимое количество загрязняющих частиц в 100 см^3 для указанных классов чистоты: в диапазоне размеров 5–10 мкм — соответственно 8 и 16 тыс. шт., 10–25 мкм — 4 и 8 тыс. шт., 25–50 мкм — 400 и 800 шт., 50–100 мкм — 50 и 100 шт., 100–200 мкм — 12 и 25 шт., волокон — 4 и 5 шт. Для силовых трансформаторов на напряжение до 220 кВ допускается класс промышленной чистоты 11 и 12 (соответственно до и после заливки в трансформатор). В ГОСТ 17216–2001 даны рекомендации по методам измерения загрязненности масла с использованием автоматических счетчиков частиц (ИСО 11171–99) и методом счета частиц под микроскопом в проходящем свете (ИСО 4407–91).

Принятые сегодня в соответствии с нормами РД 34.45–51.300–97 измерения показателей масла требуют забора проб из действующего оборудования, что не позволяет вести непрерывный дистанционный мониторинг. В то же время известен ряд устройств и способов для оперативного контроля окисления и загрязненности жидкого диэлектрика на основе анализа спектральных оптических характеристик пропускания и флуоресценции; они изложены, например, в [6–7]. Изучение различных оптических свойств электроизоляционных жидкостей — весьма перспективное направление и, вполне вероятно, в будущем позволит создать системы непрерывного контроля их качества. Поэтому в настоящей работе рассматриваются оптические методы, позволяющие дать более полную количественную оценку наличия механических частиц и шлама в жидких диэлектрических средах.

Известно, что универсальным способом исследования коллоидно-дисперсионных систем

(к которым можно отнести и технические масла) является измерение рассеяния излучения [8]. Экстинкция (затухание электромагнитной волны при ее прохождении через среду со скоплением мелкодисперсных частиц) обусловлена процессами рассеяния и поглощения излучения, развивающимися одновременно. Указанное явление многогранно, характеризуется многофакторной зависимостью и не поддается простому описанию, вследствие чего в качестве критерия параметра, отражающего оптические свойства, в частности трансформаторного масла [9], зачастую выбирают относительную характеристику K_{oc} (коэффициент относительного светопропускания, %, который иллюстрирует изменение состояния жидкой среды по отношению к эталону. В нашей работе для сравнительной оценки состояния электроизоляционной жидкости проводилось сопоставление значений коэффициента относительного светопропускания проб трансформаторного масла до эксплуатации и после регенерации. Образцы указанной электроизоляционной жидкости были получены с подстанций Ленэнерго и снабжены протоколами испытаний. K_{oc} проб жидкого диэлектрика определялся с помощью стандартного фотоэлектрического микроколориметра МКМФ-1. Прибор позволяет оценить K_{oc} для определенного набора светофильтров с длиной волны λ , равной 425, 458, 515, 540, 578 и 610 нм. Погрешность измерения K_{oc} составляет 1 % и складывается из приборных и случайных погрешностей, обусловленных способом заливки исследуемых жидкостей в измерительную ячейку, стабильностью температурного режима и напряжения в электросети (что, как следствие, приводит к незначительным смещениям спектра источника света) и т. д.

Для осуществления калибровки прибора в измерительную кювету микроколориметра (объемом 0,5 мл) заливалась эталонная жидкость, в качестве которой в нашем случае был выбран синтетический жидкий углеводород фенилксилилэтан (универсальная пропитывающая диэлектрическая среда для изоляции конденсаторов, кабелей и трансформаторов наружной установки). В гнездо для светофильтров измерительного узла устанавливался фильтр с узкой полосой пропускания, после чего прибор калибровался таким образом, чтобы его показания составляли 100 %. Затем в измерительном гнезде прибора устанавливалась кювета с исследуемым маслом. Показания микроколориметра фиксировались как коэффициент относительного светопропускания исследуемого жидкого диэлектрика по сравнению с эталоном на данной длине волны.

Измерения проводились при температуре окружающего воздуха 5 °С, при которой обычно согласно ГОСТ 982–80 оценивают прозрачность трансформаторного масла. Для каждой пробы исследуемых жидкостей зависимость $K_{oc} = f(\lambda)$ снималась по 5 раз, после чего проводилась стандартная статистическая обработка. Средние значения коэффициента относительного светопропускания образцов масла на различных длинах волн приведены в таблице.

Видно, что K_{oc} исходного трансформаторного масла (проба 1), измеренного непосредственно перед заливкой в трансформатор на длине волны 425 нм (наиболее чувствительной к присутствию в пропитывающей среде продуктов старения, ионов металлов, примесей и т. п.), в среднем на 7 % выше K_{oc} исходного масла, но после семи лет хранения в герметичной емкости (проба 2). Указанный результат, на

Значения коэффициента относительного светопропускания K_{oc} для проб трансформаторных масел

λ , нм	K_{oc} , %		
	Проба 1: исходное масло	Проба 2: исходное масло после 7 лет хранения	Проба 3: регенерированное масло
425	77,1	69,8	0,9
458	96,4	88,9	13,3
515	98,3	93,2	57,7
570	98,4	93,4	82,7
610	99,0	94,0	91,1

наш взгляд, подтверждает тот факт, что в масле даже при отсутствии активных катализаторов происходит постепенное старение. Исследования регенерированного масла (проба 3) показали, что на длине волны 425 нм его K_{oc} составил всего 0,9 %, что свидетельствует о существенном изменении химического состава жидкого диэлектрика.

Далее были выполнены измерения спектров пропускания и флуоресценции указанных масел с применением спектрометра Avantes-2048. Используя методику, представленную в работе [10], были определены длины волн отсечки λ_c пропускания в коротковолновой области видимого света. Для проб 1–3 λ_c составило 430, 420 и 500 нм. Для отработанного трансформаторного масла (проба 4) было получено значение $\lambda_c = 500$ нм. Также была подтверждена тенденция к снижению интенсивности флуоресценции масла при его старении [10], в частности интенсивность флуоресценции масла в пробе 4 оказалась на два порядка ниже, чем в пробах 1–2.

Помимо этого, нами предлагается более информативная методика количественной оценки наличия примесей в технических жидких средах [11], позволяющая проводить измерения как на образцах в лаборатории, так и в потоке масла при его перекачке или в процессе очистки. Указанная методика позволяет определить размеры и форму загрязняющих частиц, а также оценить их концентрацию. Суть методики заключается в фиксировании телевизионной камерой изображений быстро движущихся частиц в трансформаторном масле при его освещении импульсным некогерентным светом. Измерительная установка, схема которой представлена на рис. 1, состоит из волоконно-оптического осветителя II, кюветы (установленной в фокальной плоскости объектива), через которую прокачивается трансформаторное масло с исследуемыми частицами, и микроскопа с телевизионной камерой. При помощи волоконно-оптического осветителя осуществляется эффективное преобразование мощного когерентного излучения импульсного лазера в некогерентное излучение с широким спектром (без существенного изменения длительности импульса) и его доставка к оптической системе микроскопа.

Принцип действия осветителя поясняет рис. 1. Импульсное когерентное излучение ла-

зера на основе иттриевого граната (YAG: Nd³⁺) проходит через светофильтр, который отсекает инфракрасное излучение, затем попадет на входной торец световода с кварцевой сердцевиной. Пройдя световод, через волоконный соединитель излучение попадает в отрезок полимерного оптического волокна, активированного флуоресцирующим красителем (ФПОВ). В отрезке ФПОВ происходит поглощение когерентного излучения накачки на длине волны 532 нм, которое преобразуется в некогерентное излучение флуоресценции. Излучение флуоресценции попадает на коллиматор, при помощи которого преобразуется в параллельный пучок света. Короткий импульс (10 нс) некогерентного света большой мощности от волоконного осветителя проходит через кювету с исследуемыми микроскопическими частицами и попадает в микрообъектив микроскопа.

Микроскоп формирует увеличенное изображение частиц, которое регистрируется телевизионной камерой. Если полагать, что для получения качественного изображения частиц

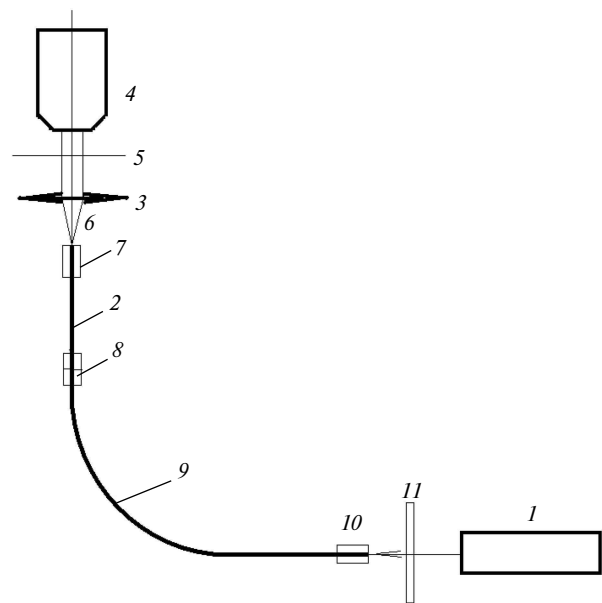


Рис. 1. Схема измерительной установки [11]:

1 — лазерный излучатель; 2 — отрезок полимерного оптического волокна, активированного флуоресцирующим красителем; 3 — коллиматор; 4 — микрообъектив микроскопа; 5 — фокальная плоскость микрообъектива; 6 — световой пучок; 7 — выходной соединитель; 8 — соединитель; 9 — волоконный световод с кварцевой сердцевиной; 10 — входной соединитель; 11 — светофильтр

микронного размера необходимо, чтобы за время импульса 10 нс смещение частицы не превышало 1 мкм, то оценочное значение максимальной скорости потока составляет 100 м/с.

Известно, что глубина зоны резкости (ГЗР) изображений (в современной литературе часто называемая глубиной резко изображаемого пространства) при использовании микроскопа зависит от параметров оптической системы микроскопа, расходимости излучения осветителя и других параметров [12]. Для большинства микроскопов эта величина приводится в техническом описании. Однако определить точное значение ГЗР не представляется возможным. Поэтому, используя изображения частиц в объеме, можно только оценить их концентрацию n по формуле $n = N/(hS)$, где N — среднее количество видимых частиц, S — площадь поля зрения микроскопа, h — оценочная величина ГЗР. В данной работе приблизительное значение величины h было экспериментально измерено с использованием наклонно расположенной кварцевой штриховой меры. Для объектива 10× оценочные величины h и S составляли 100 мкм и 256060 мкм², для объектива 4× — 250 мкм и 1497780 мкм². При необходимости для более точного определения концентрации можно использовать бинокулярную насадку, обладающую стереоскопическим эффектом, с двумя телевизионными камерами.

Измерение относительного количества частиц (например, изменения количества загрязняющих частиц в процессе старения или очистки масла) не требует знания величины ГЗР. Поэтому точность таких измерений фактически зависит только от количества статистически обработанных изображений. Изменение среднего количества видимых частиц соответствует изменению их концентрации в жидкости.

На оптические и, возможно, электрические характеристики влияют прежде всего мелкие частицы, находящиеся в масле в большом количестве и являющиеся основной причиной рассеяния света. Однако в соответствии с ГОСТ 17216–2001 для жидкостей класса чистоты 3 и более количество частиц с диаметром менее 5 мкм не нормируется. Для трансформаторного масла по РД 34.45–51.300–97 регламентируется показатель «прозрачность масла», который вследствие отсутствия количественного критерия является субъективным.

Основная проблема измерений параметров загрязняющих частиц и их концентрации — малый объем жидкости в зоне резкости изображения (ЗРИ) микроскопа. Как следствие — малая вероятность обнаружения частиц при малых концентрациях. Так, например, при концентрации частиц 16000 на 100 см³ (что соответствует величине $1,6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$) вероятность появления частицы в ЗРИ составляет $4 \cdot 10^{-3}$ при использовании объектива 10× и $6 \cdot 10^{-2}$ — при объективе 4×. То есть в среднем только на одном из 245 изображений для объектива 10× и на 17 — для 4× будет видна одна частица. Поэтому данный метод наиболее эффективен для класса технической чистоты 10 и ниже. Для жидкостей с классом чистоты выше 10 необходимо использовать автоматизированную запись и обработку изображений, а также проводить измерения с использованием различных объективов.

На рис. 2, а приведено изображение движущихся частиц в потоке трансформаторного масла, полученное при помощи описанной выше установки. Для сравнения на рис. 2, б представлено изображение движущихся частиц, полученное при освещении масла когерентным светом. На рис. 2, б видим случайно расположенные темные и светлые пятна, называемые спекл-пятнами, или просто «спеклами». Получив рис. 2, б, невозможно определить размеры и количество посторонних частиц. В то время как на рис. 1, а частицы четко различимы.

Основное преимущество предлагаемой методики по сравнению с методами, основанными на эффекте малоуглового рассеяния, — возможность идентификации загрязняющих частиц по их форме и существенно более точного измерения размеров частиц несферической формы.

Кроме того, по сравнению с методами, основанными на использовании механических фильтров (в частности, мембранных фильтров по ГОСТ 17216–2001), возникает возможность регистрации частиц, не являющихся твердыми (пузырьки воздуха, микрокапли воды и другие оптические неоднородности). Регистрация изображений движущихся частиц позволяет проводить измерения параметров загрязнения в работающих электротехнических устройствах, при перекачке или в процессе очистки масла. Достоинством метода является и возможность отличать частицы, движущиеся вместе с потоком

масла, от загрязняющих частиц, осевших на поверхностях оптической кюветы, а также от дефектов матрицы телевизионной камеры.

В ходе эксперимента были получены по 100 изображений потока трансформаторного масла в пробах 1–4. Далее были проанализированы количество и размер частиц в заданных кадрах видеоизображений, а также была проведена статистическая обработка полученных результатов. С учетом параметров выше указанной оптической системы была определена концентрация загрязняющих частиц, в штуках на 100 см^3 . Было выявлено: в пробе 4—440 млн, 3—460 тыс., 2—4200 тыс., 1—40 тыс. При этом для проб масла 2–4 диапазон размеров измеренных частиц составил от 0,6 до 8 мкм, а максимальная плотность распределения по размерам колебалась в диапазоне 1–4 мкм. В пробе 1 из 100 снимков только на одном была зафиксирована частица размером 1,7 мкм. Как следует из полученных результатов, масло в пробе 2 соответствовало классу 13 технической чистоты, 3 — класс выше 11, т. е. регенерированное масло содержало загрязняющих частиц на порядок меньше, чем длительно хранившееся. Необходимо отметить, что более точное определение класса чистоты требует большего количества обрабатываемых изображений.

Отработанное масло из трансформатора даже после двух суток естественного осаждения крупных частиц визуально выглядело мутным, что обусловлено высокой концентрацией частиц малого размера. В связи с отсутствием частиц с размерами более 10 мкм, отработанное масло из пробы 4 могло быть отнесено к классу 14, хотя визуально не соответствовало требованию «прозрачности». Таким образом, для жидкостей, сильно загрязненных мелкодисперсными частицами, рассмотренный выше метод позволяет получить количественную оценку загрязнения и исключить субъективный критерий оценки качества масла.

Как известно, еще одна проблема определения концентрации загрязняющих частиц в чистых жидкостях заключается в том, что их количество может увеличиться при заборе пробы, и это приводит к недостоверным результатам испытаний. Дополнительное загрязнение также могут внести элементы оптической кюветы и прокачки масла. Поэтому проведение испытаний без забора пробы жидкой среды, т. е. непосредственно в объекте ее использования (если это техни-

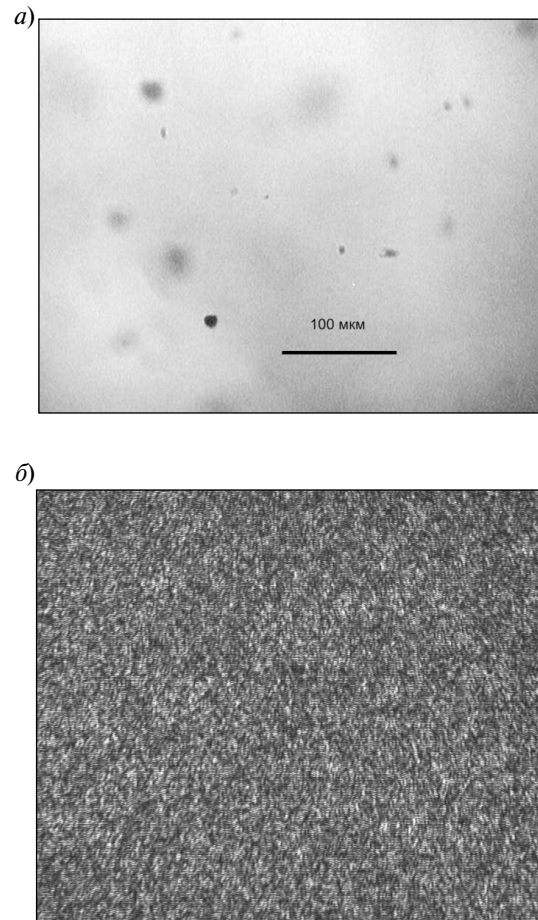


Рис. 2. Изображения частиц в потоке масла, движущихся со скоростью 0,5 м/с, полученные с использованием волоконно-оптического осветителя (а) и в когерентном свете (б)

чески возможно), способствует повышению точности испытаний. Указанный подход (получение изображений движущихся частиц в потоках) был опробован на различных типах технического масла и показал высокую эффективность [11].

Таким образом, создан практический инструмент для фиксации частиц в жидких диэлектриках в процессе эксплуатации. Более детальное изучение оптических свойств изоляционных масел в процессе эксплуатации, на наш взгляд, позволит в дальнейшем выработать технически и экономически обоснованный критерий определения срока замены масла в электротехническом оборудовании (до момента оседания шлама на его элементах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лизунов, С.Д.** Проблемы современного трансформаторостроения в России [Текст] / С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин // Электричество.— 2000. № 8.— С. 2–11;
2. **Быстрицкий, Г.Ф.** Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов [Текст] / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин.— М.: Издательский центр «Академия», 2003.— 176 с;
3. **Журавлева, Н.М.** Стабилизация диэлектрических потерь в процессе термостарения бумажно-пропитанной изоляции [Текст]: Дис. канд. ... тех. наук, спец. 05.06.09 / Н.М. Журавлева.— ЛПИ.— Л., 1989.— 187 с.
4. **Шахнович, М.И.** Трансформаторное масло [Текст] / М.И. Шахнович, Р.А. Липштейн.— М.: Энергия, 1983.— 296 с;
5. **Львов, М.Ю.** Оценка предельного состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов [Текст] / М.Ю. Львов, К.М. Антипов, Ю.Н. Львов [и др.] // Электрические станции.— 2008.— № 1.— С. 44–49.
6. **Патент РФ на изобретение №2402754.** Способ эксплуатационного контроля состояния трансформаторных масел [Текст] / В.К. Козлов, И.А. Муратаев, Г.А. Муратаева.— БИ №27.— 10.2010.
7. **Патент РФ на изобретение №2361209.** Способ оперативного контроля окисления масла и устройство для его осуществления / Л.В. Маркова, В.М. Макаренко, М.С. Семенюк, Н.К. Мышкин.— БИ №19.— 10.07.2009.
8. **Журавлев, С.П.** Влияние термоактивационного взаимодействия на электрофизические характеристики компонентов изоляции полипропиленовых конденсаторов промышленной частоты [Текст]: Дис. канд. ... тех. наук.; спец. 05.06.09 / С.П. Журавлев.— СПбГПУ.— СПб., 2003.— 204 с.
9. **Гречко, О.Н.** Взаимосвязь характеристик трансформаторного масла в процессе эксплуатационного старения. Исследование старения и срока службы внутренней изоляции электрооборудования высокого напряжения [Текст] / О.Н. Гречко, Л.А. Горчакова // Сб. научн. трудов НИИПТ.— Л.: Энергоатомиздат, 1985.— С. 40–45.
10. **Муратаева, Г.А.** Контроль состояния трансформаторного масла методами спектроскопии в видимой и инфракрасной областях [Текст]: Дис. канд. ... тех. наук., спец. 05.11.13 / Г.А. Муратаева / Каз. гос. энергетический ун-т.— Казань, 2011.— 157 с.
11. **Патент РФ на полезную модель №122187.** Волочно-оптический осветитель / Д.В. Кизеветтер, А.Ю. Савина, А.И. Бодров, Н.О. Стельмакова, П.Г. Габдуллин, В.М. Левин, Г.Г. Баскаков, Н.В. Ильин, Н.В. Банкул.— БИ №32.— 20.11.2012.
12. **Панов, В.А.** Справочник конструктора опико-механических приборов [Текст] / Под ред. В.А. Панова.— Л.: Машиностроение, 1980.— 742 с.

REFERENCES

1. **Lizunov, S.D.** The problems of the modern transformer in Russia [Text] / S.D. Lizunov, A.K. Lohanin // Electricity.— 2000.— № 8.— P. 2–11 (rus.).
2. **Bystrytsky, G.F.** Selection and operation of power transformers [Text] / G.F. Bystrytsky, B.I. Kudrin— Moscow: Publishing Center «Academy» 2003.— 176 p. (rus.).
3. **Zhuravleva, N.M.** The stabilization of the dielectric losses in the process of heat aging of impregnated paper insulation [Text]: the Dissertation of Candidate of Engineering Sciences.— 05.06.09 / Zhuravleva Natalya Mihailovna [Place of protection: Leningrad.— Polytechnical Institute.— Leningrad, 1989.— 187 p.] (rus.).
4. **Shahnovich, M.I.** Transformer oil [Text] / M.I. Shahnovich, R.A. Lipshteyn— M.: Publishing «Energy», 1983.— 296 p. (rus.).
5. **L'vov, M.J. Antipov K.M., L'vov J.N. [etc.].** Limit state assessment of power transformers and autotransformers [Text] // Elektricheskie stancil.— 2008.— № 1.— P. 44–49 (rus.).
6. **Patent RF for an invention №2402754.** Method of operating condition monitoring of transformer oil / V.K. Kozlov, I.A. Murataev, G.A. Murataeva.— ВІ. №27.— 10.2010. (rus.).
7. **Patent RF for an invention №2361209.** Method of operational control of oil oxidation and device for its implementation / L.V. Markov, V.M. Makarenko, M.S. Semeniuk, N.K. Myshkin.— ВІ. №19.— 10.07.2009 (rus.).
8. **Zhuravlev, S.P.** The influence of thermal activation interaction on the electrical characteristics of components of insulation of polypropylene power frequency capacitors [Text]: the Dissertation of Candidate of Engineering Sciences.— 05.06.09 / Zhuravlev Sergei Petrovich [Place of protection: Saint Petersburg State Polytechnical University.— Saint Petersburg, 2003.— 204 p.] (rus.).
9. **Grechko, O.N.** Correlation of properties of transformer oil in the operational aging. The study of aging and lifetime of the internal insulation of high voltage electrical equipment [Text] / O.N. Grechko, L.A. Gorchakov // Collection of NIPT scientific papers— L.: Energoatomizdat, 1985.— P. 40–45 (rus.).
10. **Murataeva, G.A.** Condition monitoring of transformer oil by spnktroskopii methods in the visible and infrared regions [Text]: the Dissertation of Candidate

of Engineering Sciences: 05.11.13 / Murataeva Galia Amirovna [Place of protection: Kazan State Power Engineering University, Kazan, 2011.— 157 p.] (rus.).

11. **Utility model patent PF №122187.** Fiber Optic Illuminator / D.V. Kiesewetter, A.Y. Savina, A.I. Bodrov, N.O. Stel'makova, P.G. Gabdullin, V.M. Levin,

G.G. Baskakov, N.V. Ilyin, N.V. Bankul.— ВІ.— 2012. №32.— 20.11.2012 г (rus.).

12. **Панов, В.А.** Handbook of opto-mechanical devices designer [Text] / V.A. Panov.— Edited by V.A. Panov.— Leningrad: Mechanical Engineering, 1980. — 742 p (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS

КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович — доктор физ.-мат. наук доцент кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

KIESEWETTER Dmitriy V. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

САВИНА Алла Юрьевна — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: savall_07@mail.ru

SAVINA Alla Yu. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: savall_07@mail.ru

ЖУРАВЛЕВА Наталья Михайловна — кандидат технических наук доцент кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

ZHURAVLEVA Natalya M. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Викторович — студент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vorobalekc@mail.ru

VOROBUEV Alexander V. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: vorobalekc@mail.ru