

Spectral Methods for Monitoring Transformer Equipment State of Paper Insulation

Kozlov V.K., Kurakina O.E., Sabitov A.H., Nigmatullina G. F., Salyakhutdinov R. A.
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The insulation of an oil-filled transformer is based on materials of organic origin - oil and wood pulp. The state of insulation is a key factor in the reliable operation of a power equipment, and much attention is paid to the insulation state assessment by researchers. To assess the cellulose insulation state, indicators such as the degree of polymerization and paper moisture are determined. The existing methods for determining the moisture content and the degree of polymerization of a paper insulation have disadvantages, as they require a complex process of sampling the insulation, which is a time-consuming operation. The purpose of the work is to develop new methods for determining the moisture content and the degree of polymerization of the paper insulation of a power transformer. This goal is achieved by obtaining the reflection spectra of the paper insulation samples and constructing two correlation lines to determine the degree of polymerization and humidity. The most significant result of the article is the establishment of the dependence of the reflection coefficient of the paper on the concentration of water exceeding 4% and the position of the minimum in the reflection spectrum of paper insulation on the degree of polymerization. The significance of the obtained results lies in the fact that the optical method for determining the moisture content and the degree of polymerization of paper insulation using the constructed correlation lines is highly accurate and does not require the use of additional reagents and complex calculations.

Keywords: cellulose insulation, spectroscopy, moisture content, degree of polymerization.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.03>

UDC: 621.315.615.22

Metode spectrale de monitorizare a stării izolației din hârtie a echipamentelor transformatoare

Kozlov V.K., Kurakina O.E., Sabitov A.H., Nigmatullina G.F., Saliyahutdinov R.A.

Universitatea de Stat energetic din Kazani,
Kazani, Federația Rusă

Rezumat. Baza izolației unui transformator de putere umplut cu ulei este formată din materiale de origine organică - ulei mineral din petrol și pastă de lemn. Pentru a evalua starea izolației cu celuloză, se determină indicatori precum gradul de polimerizare și umiditatea hârtiei. Metodele actuale de determinare a conținutului de umiditate și a gradului de polimerizare a izolației hârtiei au dezavantaje, deoarece prevăd un proces complex de izolație de eșantionare, care este o operațiune care necesită timp. Aceste metode contribuie, de asemenea, la distrugerea parțială a izolației hârtiei, necesită un număr mare de specialiști pentru transport și examinare. Scopul lucrării este de a dezvolta noi metode pentru determinarea conținutului de umiditate și a gradului de polimerizare a izolației din hârtie a unui transformator de putere. Acest obiectiv este atins prin obținerea spectrelor de reflexie ale mostrelor de izolație din hârtie și construirea a două linii de corelație pentru a determina gradul de polimerizare și umiditate. Cel mai semnificativ rezultat al articolului este stabilirea dependenței coeficientului de reflexie al hârtiei de concentrația apei la valori mai mari de 4% și poziția minimumului în spectrul de reflexie al izolației hârtiei asupra gradului de polimerizare. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că metoda optică de determinare a conținutului de umiditate și a gradului de polimerizare a izolației hârtiei, folosind liniile de corelare construite, este foarte precisă și nu necesită utilizarea de reactivi suplimentari și calcule complexe, deoarece precum și eșantionarea izolației din hârtie, ceea ce va simplifica și va reduce timpul de cercetare.

Cuvinte-cheie: izolația din celuloza, spectroscopie, umiditate, grad de polimerizare.

Контроль состояния бумажной изоляции трансформаторного масла по оптическим спектрам
Козлов В.К., Куракина О.Е., Сабитов А.Х., Нигматуллина Г.Ф., Саляхутдинов Р.А.
 ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет,
 Казань, Российская Федерация

Аннотация. Основу изоляции силового маслонаполненного трансформатора образуют материалы органического происхождения – нефтяное минеральное масло и древесная целлюлоза. Целлюлоза применяется в промышленности для изготовления бумажной изоляции. Поскольку состояние изоляции является ключевым фактором надежной работы энергетического оборудования, оценке состояния изоляции уделяется большое внимание исследователей и промышленности. Процесс старения целлюлозной изоляции проходит под влиянием тепловых, химических и других различных воздействий, что, в свою очередь, ухудшает диэлектрические характеристики изоляции. Для оценки состояния целлюлозной изоляции определяют такие показатели как степень полимеризации и влажность бумаги. Существующие на данный момент методы определения влагосодержания и степени полимеризации бумажной изоляции имеют недостатки, так как предусматривают сложный процесс отбора проб образцов изоляции, что является длительной по времени операцией. Эти методы также способствуют частичному разрушению бумажной изоляции, требуют большого количества специалистов для транспортировки и экспертизы. Целью работы является разработка методов определения влагосодержания и степени полимеризации бумажной изоляции силового трансформатора. Поставленная цель достигается за счет получения спектров отражения образцов бумажной изоляции и построения двух корреляционных зависимостей для определения степени полимеризации и влажности. Наиболее существенным результатом статьи является установление зависимости коэффициента отражения бумаги от концентрации воды при её значениях больше 4% и положения минимума в спектре отражения бумажной изоляции от степени полимеризации. Значимость полученных результатов состоит в том, что оптический метод определения влагосодержания и степени полимеризации бумажной изоляции, с помощью построенных корреляционных прямых, обладает высокой точностью и не требует использования дополнительных реагентов и сложных вычислений, а также отбора проб бумажной изоляции, что позволит упростить и сократить время исследования.

Ключевые слова: целлюлозная изоляция, спектроскопия, влагосодержание, степень полимеризации.

ВВЕДЕНИЕ

Основу изоляции силового маслонаполненного трансформатора образуют материалы органического происхождения – нефтяное минеральное масло и древесная целлюлоза. Целлюлоза применяется в промышленности для изготовления бумажной изоляции. Целлюлозные изоляционные материалы очень широко применяются в силовых трансформаторах, в конструкциях до 1500 МВА [1].

Поскольку состояние изоляции является ключевым фактором надежной работы энергетического оборудования, оценке состояния изоляции уделяется большое внимание исследователей и промышленности [2].

Целлюлоза является гидрофильным веществом, поскольку содержит гидроксильные группы, которые взаимодействуют с водой с образованием водородных связей. Когда вода проникает в аморфные участки волокна, она взаимодействует со свободными гидроксильными группами и группами, разорванными связи с другими макромолекулами волокна. Мицеллы образуются из скоплений макромолекул целлюлозы, в которых зазоры между

молекулами составляют около 1 нм. В свою очередь, из мицелл образуются элементарные волокна – фибриллы, в которых зазоры между мицеллами составляют около 10 нм. Молекулы воды могут проникать очень глубоко внутрь структуры целлюлозы, поскольку их размер очень мал (примерно 0,25 нм). После попадания в зазоры между макромолекулами они закрепляются на макромолекулах за счет притяжения гидроксильными группами. Этим объясняется невозможность полного устранения гигроскопичности древесины и всех целлюлозных материалов пропиткой.

В связи с выше изложенным необходимо контролировать содержание воды в целлюлозной изоляции, так как при ее слишком высоком уровне трансформатор может выйти из строя при перегрузке и быстрее достигнет конца своего срока службы, так как бумажная изоляция быстрее стареет [3]. Вода может мигрировать из древесины и прессованного картона по всей системе, в конечном итоге увеличивая содержание воды в бумаге [4].

Термическая дегидратация, гидролиз и окислительная деструкция, каталитический кислотный алкоголиз являются наиболее значимыми процессами деструкции целлюлозной изоляции обмоток, приводящими к обра-

зованию воды в бумаге и снижению механической прочности бумажной изоляции.

Попадание влаги в бумажную изоляцию обычно связано с механическими повреждениями изоляционных конструкций и изменением температурных условий [5]. В аварийных ситуациях влага может попадать в изоляцию из системы охлаждения и других устройств.

Степень старения масляно-бумажной изоляции напрямую определяет срок службы трансформатора. Когда этот показатель достигает определенного уровня, с ухудшением качества изоляционной бумаги напряжение пробоя и механические свойства системы изоляции значительно снижаются, таким образом, основная изоляция трансформатора не сможет соответствовать требованиям, а система изоляции будет полностью повреждена.

Твердая изоляция трансформатора после утраты части своих первоначальных свойств не всегда может быть подвергнута регенерации. Если влага из бумажной изоляции может быть устранена в процессе ее сушки тем или иным образом, то механические свойства бумажной изоляции не восстанавливаются в процессе эксплуатации. Влажность бумаги увеличивает скорость термического старения, способствует разрушению молекул целлюлозы, ухудшает механические характеристики [6].

В предыдущих работах авторы отмечали, что вода в целлюлозном волокне может присутствовать в виде свободной воды, капиллярной воды и молекулярно-связанной воды. Чаще всего свободной называют воду, находящуюся вне волокон. Силы, связывающие ее с целлюлозой, весьма незначительны, поэтому ее можно без всяких затруднений удалить, например, фильтрацией, отжимом или центрифугированием.

Капиллярная вода располагается в капиллярах, трещинах и порах волокон. Эта вода связана с целлюлозой силами поверхностного натяжения, и для ее удаления требуется значительно больше энергии.

Если молекулы воды непосредственно связаны с гидроксильными группами целлюлозы силами, подобными действующим в истинных растворах, такую воду называют молекулярно-связанной. Для ее выделения требуется намного большее количество энергии (преимущественно тепловой), чем для удаления капиллярной воды. Молекулярно-связанная вода из целлюлозы практически

может быть удалена лишь при высушивании волокнистого материала до постоянной влажности, однако без деструкции целлюлозных макромолекул.

Влажность масла лежит в пределах 0,001...0,01 %, бумага в силовых трансформаторах может приобретать влажность в диапазоне 1...10 % (в среднем 4 %), что приблизительно соответствует влажности бумаги в воздухе при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха около 50 %.

Для трансформаторов, отработавших установленные нормативно-технической документацией сроки, допускается значение влагосодержания твердой изоляции трансформаторов, прошедших капитальный ремонт (2 %), а для эксплуатируемых трансформаторов – 4 % по массе [7].

Авторами доказано в своих работах, что скорость разложения бумаги при содержании влаги в ней увеличивается пропорционально процентному содержанию воды в бумажной изоляции. Это явление работает при содержании влаги в диапазоне 0,3...7 %. При влагосодержании 2 % старение бумаги происходит в 6–16 раз быстрее, а при содержании 4 % увеличивается в 12–45 раз по сравнению со случаем влагосодержания 0,3 %.

Таким образом, наличие влаги сокращает срок службы изоляции, что в конечном итоге влияет на срок службы трансформатора.

Также в качестве индикатора старения изоляции бумажной изоляции используют такие показатели как степень полимеризации, диоксид углерода, монооксид углерода и 2-фурфуральдегид. Степень полимеризации, измеренная с помощью разрушающего метода испытания, дает прямую оценку состояния бумажной изоляции с учетом количества линейных целлюлозных полимеров в цепной структуре. Это число напрямую зависит от физической прочности целлюлозы. Целлюлоза является натуральным полимером со степенью полимеризации 1200, что указывает на здоровую бумагу, в то время как в результате старения в процессе эксплуатации это значение снижается до 250 и менее, что свидетельствует о плохом состоянии бумаги [8,9].

В настоящее время степень полимеризации определяют согласно ГОСТ 25438-82. Расчет степени полимеризации происходит по определенной в растворе кадмийэтилендиаминового комплекса (кадоксена) вязкости целлюлозы [10]. Использование этого метода требует

вскрытия трансформатора и отбора проб, что приводит к повреждению изоляции.

Хотя степень полимеризации является наиболее точным индикатором для оценки разложения бумажной изоляции, он редко используется в промышленности из-за сложности сбора образцов бумаги, особенно в местах повышенного риска. Было проведено много исследований, чтобы сопоставить значение степени полимеризации с другими измеримыми химическими индикаторами и характеристиками масла. К таким индикаторам относятся фурановое соединение (2-Fal) [11], оксиды углерода (CO и CO₂) [12], метанол (MeOH) [13], этанол (EtOH) [14], влага в масле [15] и межфазное натяжение масла [16].

В настоящее время разработаны различные методы, помогающие оценить состояние изоляционной бумаги, включая напряжение пробы, предел прочности при растяжении, степень полимеризации и кулонометрическое титрование по методу Карла Фишера [17]. Совсем недавно появились методы спектроскопии в частотной области (FDS) [18], тока поляризации и деполяризации (PDC) [19] и измерения восстанавливающегося напряжения (RVM) [20], которые основаны на диэлектрическом отклике. В [21] проводится предварительная оценка долговечности бумажно-масляных систем в лабораторных условиях путем установления связи между этанолом и степенью полимеризации. Так же распространены следующие методы: метод Дина – Старка и по результатам измерения диэлектрических характеристик [22]. Данные методы определения влагосодержания и степени полимеризации бумажной изоляции имеют существенные недостатки, так как предусматривают сложный процесс отбора проб образцов изоляции, что является длительной по времени операцией. Эти методы также способствуют частичному разрушению бумажной изоляции, требуют большого количества специалистов для транспортировки и экспертизы. Авторы предлагают в своей работе неразрушающие методы диагностики, основанные на измерении оптических спектров.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения состояния изоляционной бумаги авторами разработаны методы,

позволяющие оценить такие параметры как влажность и степень полимеризации бумажной изоляции.

Для того чтобы увидеть, как изменяется спектр отражения бумаги в зависимости от влагосодержания в ней, был проведен следующий эксперимент. Был подготовлен один образец сухой трансформаторной бумаги и четыре образца с различной концентрацией воды (5; 15; 20; 30 %). При помощи высокочувствительного оптоволоконного спектрофотометра AvaSpec-2048XL были измерены спектры отражения света от трансформаторной бумаги. Найдены соотношения спектров отражения пропитанных водой образцов на спектр отражения сухой трансформаторной бумаги.

На рис. 1 представлены нормированные спектры отражения от трансформаторной бумаги, на рис. 2 – нормированные спектры отражения от трансформаторной бумаги в узком спектральном диапазоне на длине волны 850...1150 нм.

В видимой области (400–760 нм) присутствует влияние воды, которое объясняется тем, что вода заполняет поры между волокнами, вследствие чего меняется коэффициент отражения бумаги.

На рис. 2 прослеживается полоса поглощения воды на длине волны 970 нм.

По этой полосе поглощения воды можно определить концентрацию воды.

Для того чтобы в дальнейшем упростить определение влагосодержания, находим «оптическую плотность» трансформаторной бумаги по формуле:

$$D = -\lg(\tau),$$

где D – оптическая плотность; τ – коэффициент отражения.

Приведем полученные нормированные спектры оптической плотности для всех образцов трансформаторной бумаги.

На рис. 3 показана оптическая плотность (D) трансформаторной бумаги на длине волны в диапазоне 850–1150 нм.

По данным спектрам был выявлен максимум функции, который прослеживается на длине волны 980 нм для всех образцов бумаги (рис. 3) и построена зависимость «оптической плотности» от концентрации воды в бумаге на длине волны 980 нм (рис. 4).

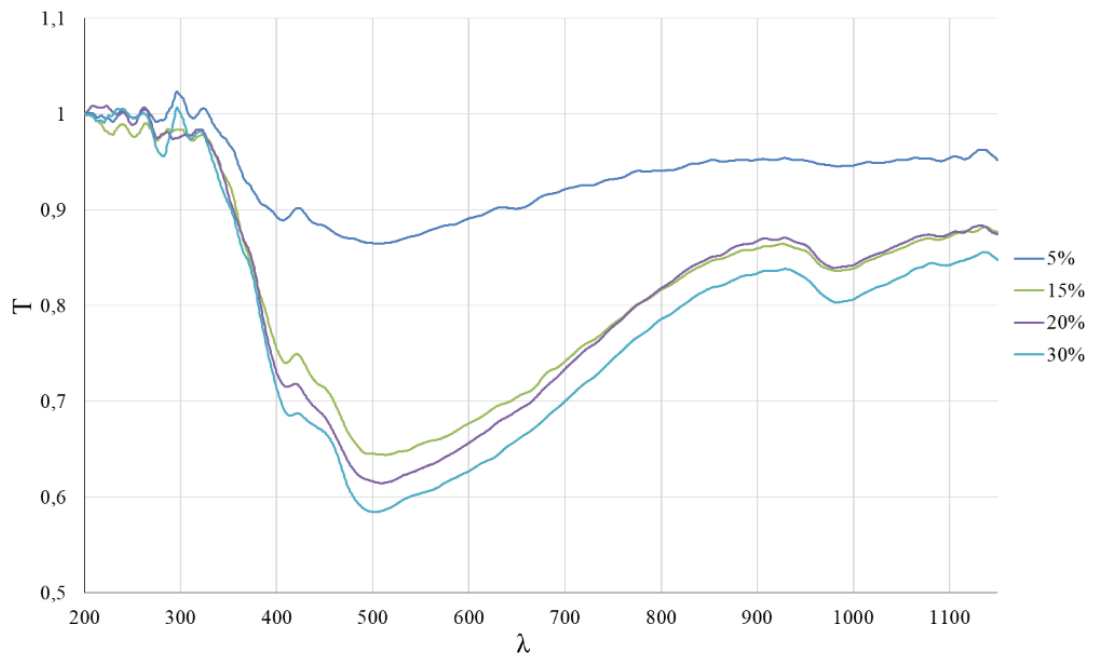


Рис. 1. Нормированные спектры отражения (τ) от трансформаторной бумаги.
Fig. 1. Normalized reflection spectra (τ) from transformer paper.

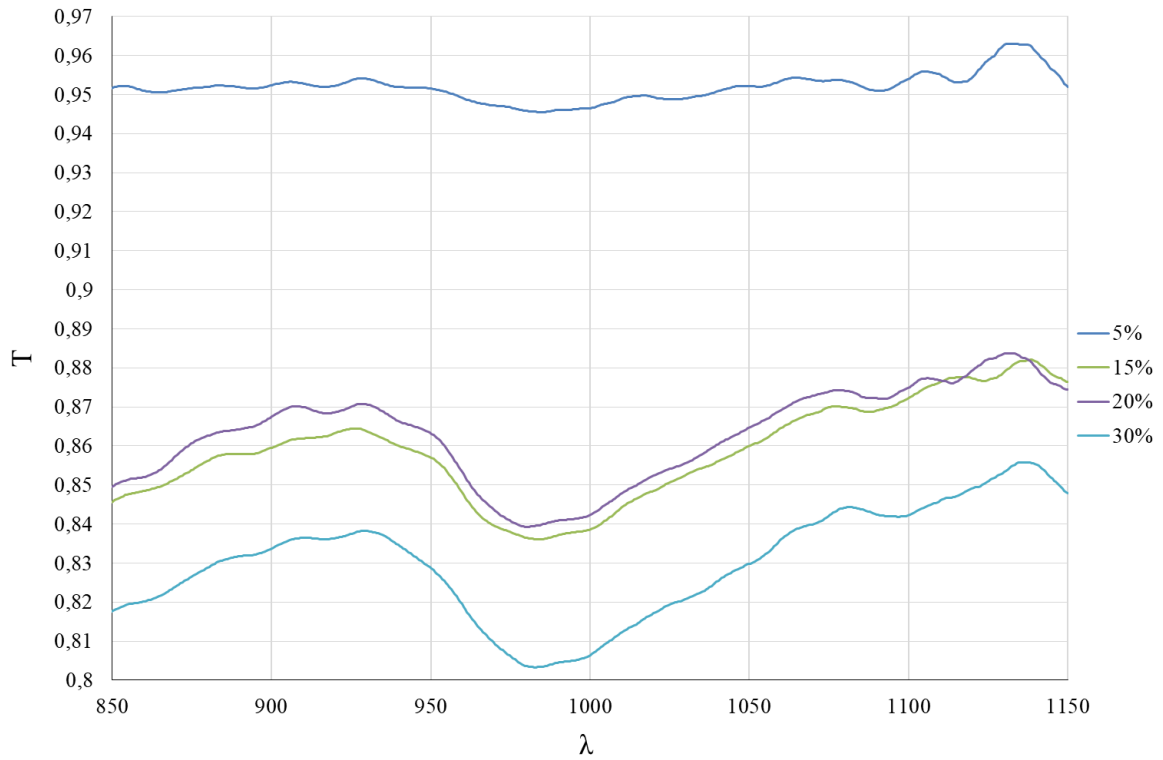


Рис. 2. Нормированные спектры отражения (τ) от трансформаторной бумаги на длине волны 850-1150 нм.
Fig. 2. Normalized reflection spectra (τ) from transformer paper at a wavelength of 850-1150 nm.

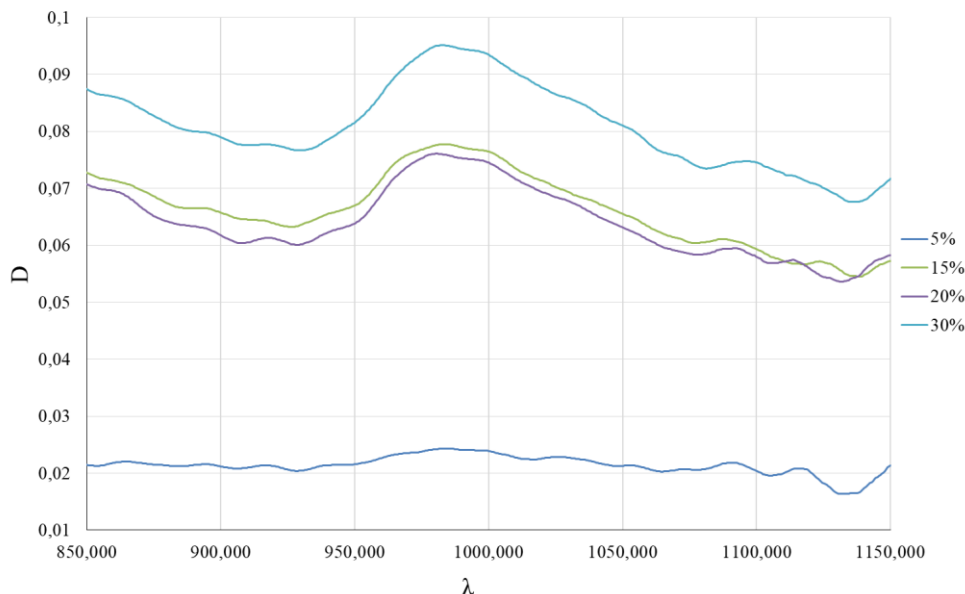


Рис.3. Оптическая плотность (D) трансформаторной бумаги на длине волны 850-1150 нм.
 Fig. 3. Optical density (D) of transformer paper at a wavelength of 850-1150 nm.

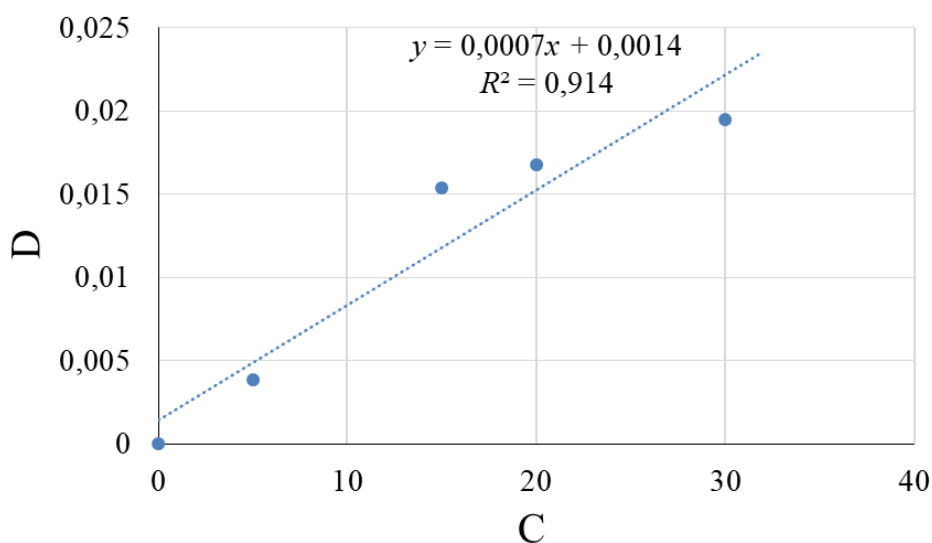


Рис. 4. Зависимость оптической плотности от концентрации воды на длине волны 980 нм.
 Fig.4. Dependence of optical density on water concentration at a wavelength of 980 nm.

Для следующего эксперимента были подготовлены десять образцов трансформаторной бумаги с различным содержанием воды и масла.

На рис. 5 представлены нормированные спектры отражения от образцов трансформаторной бумаги, пропитанных маслом и водой, на рис. 6 – нормированные спектры отражения от образцов трансформаторной бумаги, пропитанных маслом и водой, в узком диапазоне длин волн 850–1050 нм.

Измерена интенсивность и найдены коэффициенты отражения от трансформаторной бумаги.

На рис. 5 и 6 видно, что у образцов, пропитанных маслом, на длине волны 980 нм отсутствует полоса поглощения, а у образцов, пропитанных водой, присутствует полоса поглощения воды. Значения влажности масла лежат в пределах 0,001...0,01 %.

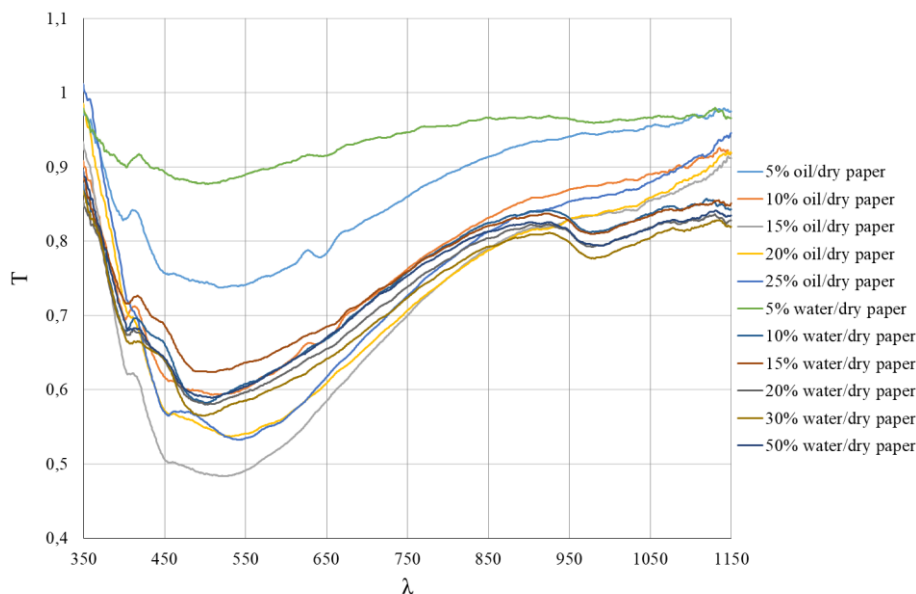


Рис. 5. Нормированные спектры отражения (τ) от образцов трансформаторной бумаги, пропитанных маслом и водой.

Fig. 5. Normalized reflection spectra (τ) from samples of transformer paper impregnated with oil and water.

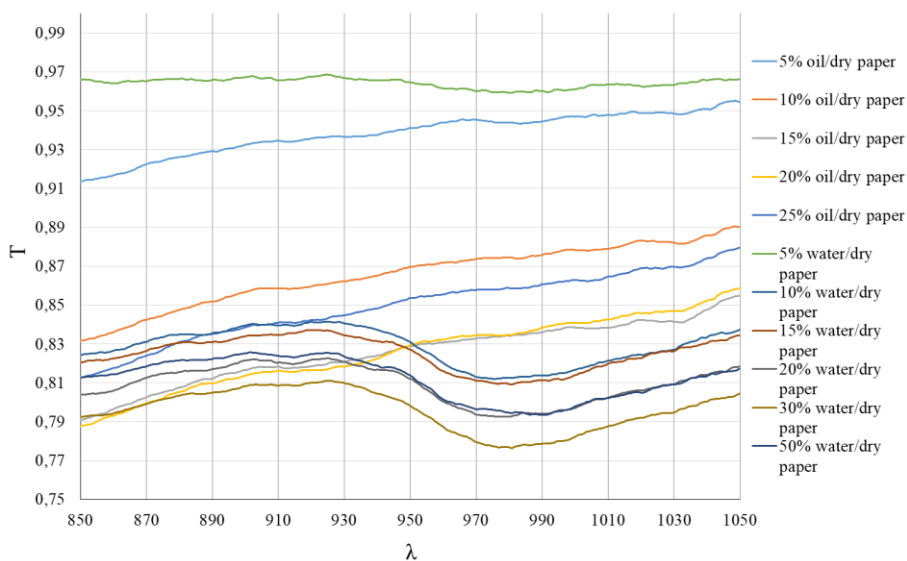


Рис. 6. Нормированные спектры отражения (τ) от образцов трансформаторной бумаги, пропитанных маслом и водой и на длине волны 850-1050 нм.

Fig. 6. Normalized reflection spectra (τ) from samples of transformer paper impregnated with oil and water and at a wavelength of 850-1050 nm.

Как видно на графиках (рис. 5), спектр отражения бумаги, пропитанной водой, в видимой области уже, чем у промасленной бумаги, и минимум функции прослеживается на длине волны 490 нм, а у спектра отражения промасленной бумаги на длине волны 540 нм. Объясняется это тем, что вода и масло заполняют поры, и меняется коэффициент отражения среды. Если излучение падает на бумагу и попадает в поры, оно проходит и отражает-

ся с одними коэффициентами, а при помещении в них воды или масла пропускание у листа становится больше.

Так как в трансформаторе бумага пропитана маслом возникает вопрос о возможности определения концентрации воды в промасленной бумаге. Для этого были подготовлены образцы бумаги, пропитанные водой и маслом. Были измерены спектры отражения от бумаги (рис. 7).

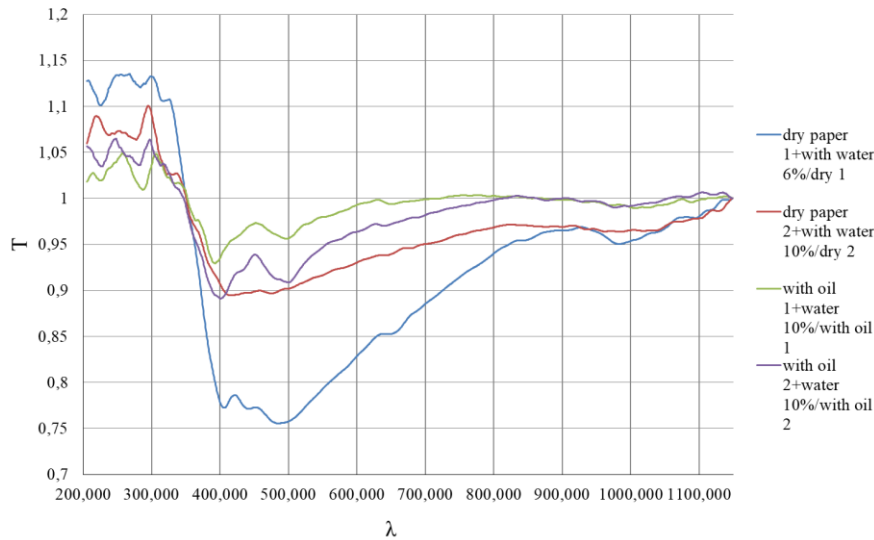


Рис. 7. Спектры отражения (τ) от образцов трансформаторной бумаги, пропитанных маслом и водой.

Fig. 7. Reflection spectra (τ) from samples of transformer paper impregnated with oil and water.

При длине волны 980 нм у промасленных образцов полоса поглощения воды слабо выражена. Таким образом, определить концентрацию воды можно только на широком интервале длин волн.

Распределение воды в изоляции подчиняется закону равновесия: при равенстве температур относительные влажности соприкасающихся сред (воздуха, масла и твердой изоляции) равны. Равновесие может быть достигнуто в течение относительно длительного времени, но тенденция к достижению равновесия постоянна. При равновесном состоянии парциальные давления водяных паров во всех трех средах равны. Когда бумага находится в трансформаторном масле, соприкасающемся с воздухом с температурой +20 °С и относительной влажностью 50 % (или 10 °С и 100 %), содержание влаги в бумаге составит примерно 2 % при температуре масла 60 °С и влагосодержании масла 20 г/т.

Так как в используемой нами трансформаторной бумаге влагосодержание 2 % и выше, образцы бумаги нужно было высушить. Было подготовлено десять образцов трансформаторной бумаги, девять образцов поместили в муфельную печь и высушили при температуре 100 °С с целью удаления влаги, содержащейся в бумаге из-за влажности воздуха. Каждый образец перед отправкой в муфельную печь взвесили на электронных весах и записали их исходную массу. Бумага в трансформаторах может приобретать влажность в среднем 4 %, что приблизительно со-

ответствует влажности бумаги в воздухе при $t = 20$ °С и относительной влажности воздуха около 50 %. Один образец взвешивали, не сушив и приняли его влажность равной 4 %. С интервалом 2 мин доставали из муфельной печи по одному образцу. Каждый образец взвешивали повторно при помощи электронных весов и находили разницу массы исходного образца от высушенного и переводили разницу в проценты, чтобы определить процентное содержание воды. Для построения спектров нашли соотношения образцов с присутствующей влагой на образец, который находился в муфельной печи дольше всего (самый высушенный), чтобы убрать из спектра «сухую» часть. На рис. 9 представлены спектры коэффициентов отражения высушенных образцов на интервале длин волн 400...1150 нм.

Явных полос поглощения воды при данных концентрациях не наблюдается, но изменяется коэффициент отражения в широкой области спектра, который можно использовать при определении влагосодержания бумаги при концентрации меньше 4%.

При изучении графика (см. рис. 8) можно наблюдать, что на длине волны 970 нм при концентрации воды менее 4% полоса поглощения воды не прослеживается. В связи с этим коэффициент отражения изучается не на полосе поглощения воды и масла, а на широком интервале длин волн (500..1100 нм), что позволяет построить зависимость коэффици-

ента отражения от концентрации влаги на длине волны 850 нм

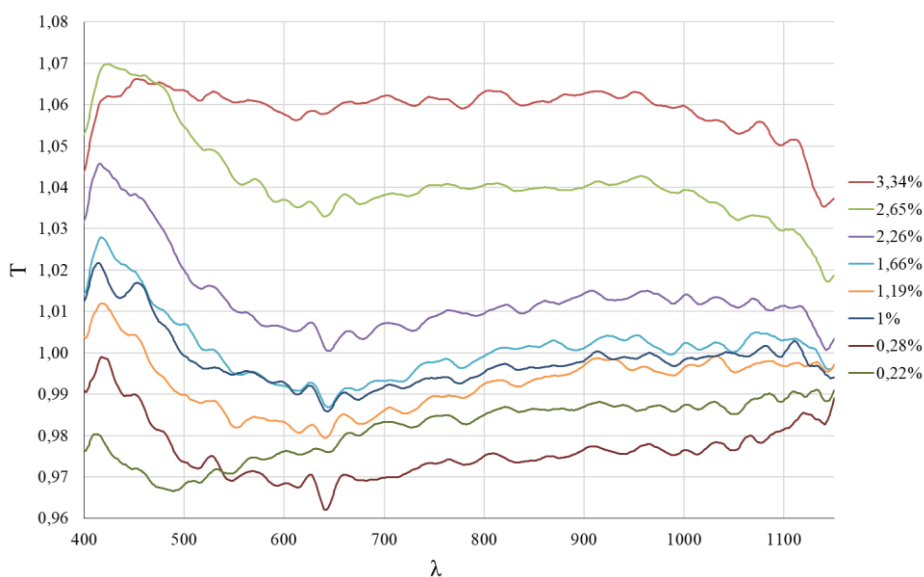


Рис. 8. Спектры коэффициентов отражения высушенных образцов на длине волны 400-1150 нм.
 Fig. 8. Reflection spectra of dried samples at a wavelength of 400-1150 nm.

На рис. 9 построена зависимость коэффициента отражения от концентрации воды на длине волны 850 нм, где нет полос поглощения трансформаторного масла.

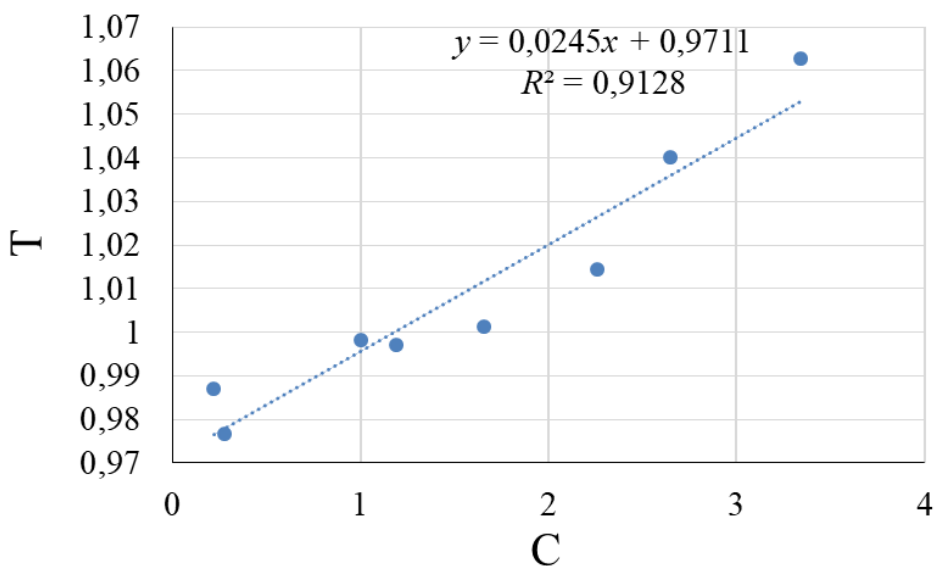


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от концентрации воды на длине волны 850 нм.
 Fig. 9. The dependence of the reflection coefficient on the concentration of water at a wavelength of 850 nm.

Таким образом можно создать устройство для определения влагосодержания бумажной изоляции, состоящее из источника излучения и приемника излучения, который настраивается на длину волны 780нм, оптического наконечника и оптико-волоконного кабеля и по зависимости коэффициента отражения определяется влагосодержание.

Следующий параметр, изученный для определения состояния бумажной изоляции, стала степень полимеризации. Для изучения изменений надмолекулярной структуры волокна, в зависимости от степени полимеризации при помощи сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Auriga Crossbeam, были сделаны снимки трех образцов трансформаторной бумаги со

степенью полимеризации 584, 410, 223 ед. На рис. 10 представлены снимки трансформаторной бумаги с разрешением 20 мкм: а) исходного образца СП = 584 ед.; б) промежуточного образца СП = 410 ед.; в)

результующего образца СП = 223 ед. На рис. 11 представлены те же снимки трансформаторной бумаги с разрешением 2 мкм.

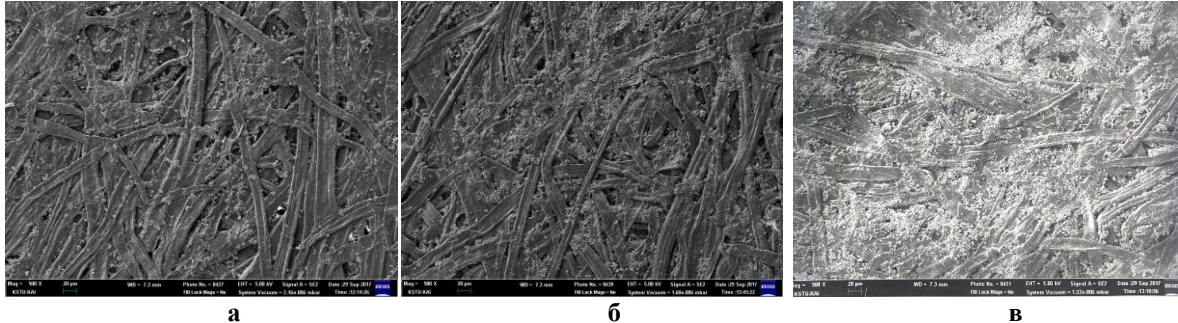


Рис. 10. Снимки трансформаторной бумаги с разрешением 20 мкм: а) исходного образца СП = 584 ед.; б) промежуточного образца СП = 410 ед.; в) результирующего образца СП = 223 ед. Спектры коэффициентов отражения высушенных образцов на длине волны 400-1150 нм.
Fig. 10. Pictures of transformer paper with a resolution of 20 microns: а) original sample SP = 584 units; б) intermediate sample SP = 410 units; в) the resulting sample SP = 223 units.
 Reflection spectra of dried samples at a wavelength of 400-1150 nm.

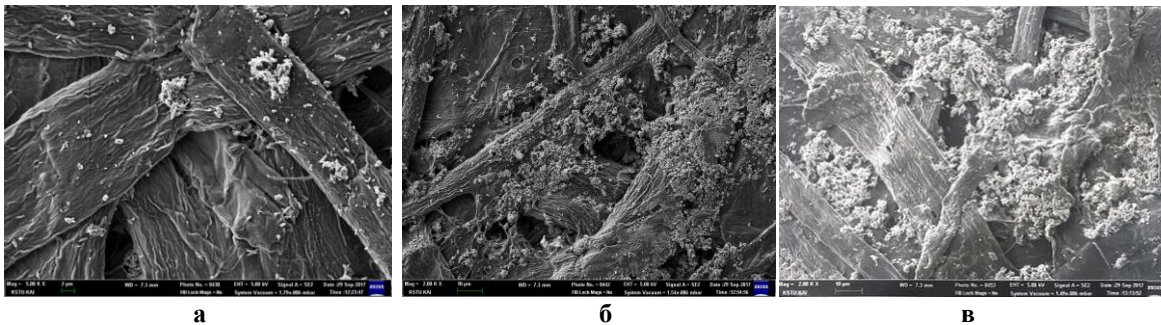


Рис. 11. Снимки трансформаторной бумаги с разрешением 2 мкм: а) исходного образца СП = 584 ед.; б) промежуточного образца СП = 410 ед.; в) результирующего образца СП = 223 ед.
Fig. 12. Pictures of transformer paper with a resolution of 2 μm: а) initial sample SP = 584 units; б) intermediate sample SP = 410 units; в) the resulting sample SP = 223 units.

Можно наблюдать две сильно отличающиеся по скорости стадии гидролитической реакции. На первой стадии происходит гидролиз аморфных участков структуры. Вторая стадия проходит со значительно более низкой скоростью, на данной стадии реакция идет за счет расщепления гликозидных связей, которые находятся на концах кристаллитов.

По окончании первой стадии гидролиза образуются фрагменты структуры, представляющие собой иглоподобные частицы. Длина иглоподобных частиц зависит от типа исходной целлюлозы, а также обуславливается размером ее кристаллитов.

Величина степени полимеризации данных фрагментов для хлопковой целлюлозы после гидролиза – 200-300, для древесной целлюлозы – 120-180, а для целлюлозы вискозных волокон – 30-50 [23]. То же самое наблюдается и при старении трансформаторной бумаги.

При помощи высокочувствительного оптоволоконного спектрофотометра AvaSpec-2048XL были измерены спектры отражения света от трансформаторной бумаги с различной степенью полимеризацией (1136, 1050, 704, 474, 438, 348, 320, 244 ед.). Зависимость коэффициентов отражения от длины волны показана на рис. 12.

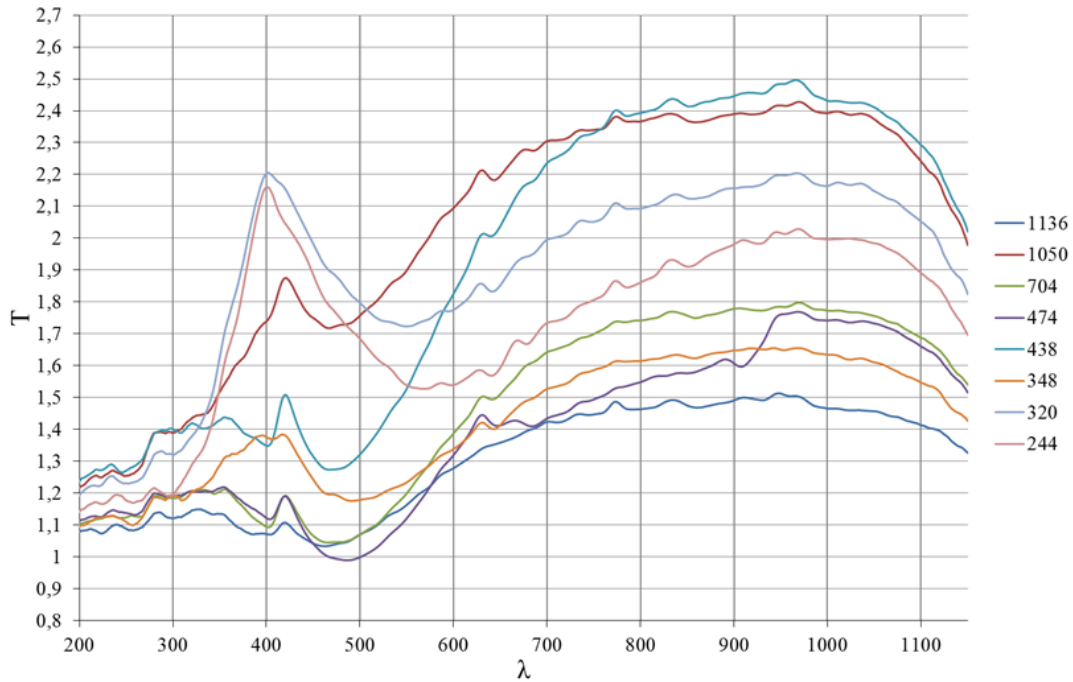


Рис. 12. Зависимость коэффициентов отражения от длины волны.
 Fig. 12. Dependence of reflection coefficients on wavelength.

Как видно на рис. 12, минимум коэффициента отражения смещается вправо в зависимости от степени полимеризации. Была построена зависимость положения минимума

в спектре отражения от степени полимеризации (рис. 13). Коэффициент корреляции составляет 0,87131.

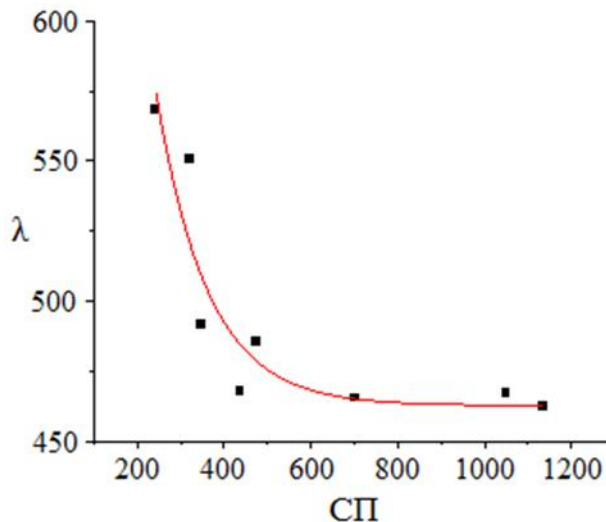


Рис. 13. Зависимость положения минимума в спектре отражения от СП.
 Fig.13. Dependence of position of minimum in the reflection spectrum on the SD.

Полученные результаты исследований позволяют измерить степень полимеризации бумажной изоляции без отбора проб с обмотки маслонаполненного трансформатора. Диапазон измерения – 250...1200 ед. Авторами

было собрано устройство для определения степени полимеризации, состоящее из оптического наконечника, оптоволоконного кабеля, источника излучения и приемника (полихроматора).

Выводы

1. Выявлена зависимость коэффициента отражения бумаги от концентрации воды при её значениях > 4%.
2. Разработан метод определения влагосодержания бумажной изоляции силового трансформатора с помощью спектров отражения, что существенно упрощает процесс исследования и определения качества изоляции, поскольку для него не требуется отбор проб изоляции, что, в свою очередь, не приводит к частичному разрушению изоляции. Не требуется длительных по времени операций, в том числе долгих вычислений, перевозки образцов изоляции с последующим их исследованием в химической лаборатории.
3. По полученным результатам предложено устройство для определения влагосодержания бумажной изоляции, состоящее из источника излучения и приемника излучения, который настраивается на длину волны 780 нм, оптического наконечника и оптоволоконного кабеля. При этом не потребуется

отбор проб, так как можно через оптоволоконные кабели измерять содержание влаги.

4. Выявлена зависимость положения минимума в спектре отражения бумажной изоляции от степени полимеризации.
5. Разработан метод определения степени полимеризации бумажной изоляции трансформатора с помощью спектров отражения, позволяющий с высокой точностью, без использования дополнительных реагентов и сложных вычислений при полученной зависимости положения минимума в спектре отражения от степени полимеризации определить степень полимеризации бумажной изоляции трансформатора.
6. По полученным результатам предложено устройство для определения степени полимеризации, состоящее из оптического наконечника, оптоволоконного кабеля, источника излучения и приемника (полихроматора).

Литература (References)

- [1] Prevost T. A., Oommen T. V. Cellulose Insulation in Oil-filled power Transformers: Part I—History and Development, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2006, vol. 22, no. 1, pp. 28-35.
- [2] Li S., Yang L., Yan W., Cui H., Ge Z., Li S. An Effective Principal Component Regression Method for Transformer Life Management Based on Indirect Parameters, *Proc. Condition Monitoring and Diagnosis*, Sep.2018, pp. 1-5.
- [3] Oommen T. V., Prevost T. A. Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II—Maintaining Insulation Integrity and Life. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2006, vol. 22, pp. 5-14.
- [4] Lelekakis N., Martin D., Guo W., Wijaya J., Lee M. A Field Study of Two Online Dry-out Methods for Power Transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2012, vol. 28, no. 3, pp. 32-39.
- [5] Basmanov V.G. Vysokovol'tnaya Izolyatsiya. Ucheb. Posobiye dlya Vuzov. [High Voltage Insulation. Proc. Allowance for Universities]. Kirov, Publishing House of VyatGU, 2006, 155 p.
- [6] Lungaard L.E., Hansen W., Linhjell D., Painter T.J. Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers. *IEEE Transaction Power Delivery*, 2004, no. 1, pp. 230-239.
- [7] STO 34.01-23.1-002-2019. *Metodicheskie Ukazaniya po Otboru Prob i Opredeleniyu Vlagosoderzhaniya Tsellyuloznoy Izolyatsii Maslonapolnennykh Transformatorov. PAO «Rosseti»* [STO 34.01-23.1-002-2019 – Guidelines for Sampling and Determining the Moisture Content of Cellulose Insulation of Oil-Filled Transformers. PJSC Rosseti]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 49 p.
- [8] Nezami M.M., Equbal M.M. Khan S.A., Sohail S., Ghoneim S.M.. Classification of Cellulosic Insulation State Based on Smart Life Prediction Approach (SLPA). *Processes*, 2001, vol. 9(6), pp. 981-985. doi: 10.3390/pr9060981
- [9] Ding H.-Z., Wang Z. D. Author Response to the Comments by P. Calvini Regarding the Article ‘On the Degradation Evolution Equations of Cellulose’, *Cellulose*, 2007, vol. 15, pp. 229-237.
- [10] *Metodicheskie Ukazaniya po Otsenke Sostoyaniya Bumazhnoy Izolyatsii Obmotok Silovykh Transformatorov i Shuntiruyushchikh Reaktorov po Stepeni Polimerizatsii* [Guidelines for Assessing the State of Paper Insulation of Windings of Power Transformers and Shunt Reactors by the Degree of Polymerization]. Available at: <http://www.transform.ru/articles/pdf/06exploitation/exp1000001.pdf> (accessed: 21.04.2022)
- [11] Martins M. A. G. Vegetable Oils an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers- Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, 2010, vol. 26, no. 6, pp. 7-13.
- [12] Mandlik M., Ramu T. S. Moisture Aided Degradation of Oil Impregnated Paper Insulation in Power Transformers, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 186-193.
- [13] Gilbert R., Jalbert J., Duchesne S., Tétreault P., Morin B., Denos Y. Kinetics of the Production of Chain-End Groups and Methanol from the

- Depolymerization of Cellulose during the Ageing of Paper/Oil Systems. Part 2: Thermally-Upgraded Insulating Papers. *Cellulose*, 2009, vol. 17, pp. 253-269.
- [14] Matharage S. Y., Liu Q., Wang Z. D. Aging Assessment of Kraft Paper Insulation Through Methanol in Oil Measurement. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 1589-1596.
- [15] Lundgaard L. E., Hansen W., Linhjell D., Painter T. J. Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers. *IEEE Trans. Power Del.*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 230-239.
- [16] Baka N. A., Abu-Siada A., Islam S., El-Naggar M. F. A New Technique to Measure Interfacial Tension of Transformer Oil Using UV-Vis Spectroscopy. 2015, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1275-1282.
- [17] Zou J., Chen W., Wan F., Fan Z., Du L. Raman Spectral Characteristics of Oil-Paper Insulation and Its Application to Ageing Stage Assessment of Oil-Immersed Transformers. *Energies*, 2016, no. 9, pp. 946-949.
- [18] Fofana I., Hemmatjou H., Meghnefi F., Farzaneh M., Setayeshmehr A., Borsi H., Gockenbach E. On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-Paper Insulation at Low Temperatures. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2010, vol. 17, pp. 805-813.
- [19] Fofana I., Hemmatjou H., Meghnefi F. Effect of Thermal Transient on the Polarization and Depolarization Current Measurements of Oil-Paper Insulation. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, vol. 18, pp. 513-520.
- [20] Wang Y., Gong S., Grzybowski S. Reliability Evaluation Method for Oil-Paper Insulation in Power Transformers. *Energies*, 2011, vol. 4, pp. 1362-1375.
- [21] Bonginkosi A. Thango, Pitshou N. Bokoro, Prediction of the Degree of Polymerization in Transformer Cellulose Insulation Using the Feedforward Backpropagation Artificial Neural Network. *Energies*, 2022, vol.15, no.12, pp.4209. doi: 10.3390/en15124209
- [22] GOST 2477-65. *Neft' i nefteprodukty. Metod opredeleniya sodержaniya vody* [State Standard 2477-65. Oil and Oil Products. Method for Determining the Water Content]. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 6 p.
- [23] Galbraikh L.S. Tsellyuloza i Ee Proizvodnye [Cellulose and its Derivatives]. *Sorosovskiy Obrazovatel'nyi Zhurnal - Soros Educational Journal*, 1996, no. 11, pp. 47-53.

Сведения об авторах.



Козлов Владимир Константинович
д.ф.-м.н, профессор.
Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: kozlov_vk@bk.ru



Куракина Ольга Евгеньевна, к.т.н., доцент. Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: random_jj@mail.ru



Сабитов Айдар Хайдарович
к.т.н, доцент. Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: sabitov_ah@mail.ru



Нигматуллина Гулина Фандамовна
магистр. Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: fandamovna@mail.ru



Саляхутдинов Ренат Айратович
магистр. Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: hard_modes@mail.ru