

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАРЕНИЯ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

В.К. КОЗЛОВ, А.Х. САБИТОВ, Б.Р. НИЗАМУТДИНОВ

Казанский государственный энергетический университет

Старение бумажно-масляной изоляции определяется изменением значения её степени полимеризации. Используемые сегодня способы оценки степени полимеризации бумажно-масляной изоляции высоковольтного оборудования обладают следующими недостатками: трудоемкость и продолжительное время получения результата, высокая стоимость проведения анализа, экологическая нагрузка, сложность и дороговизна автоматизации.

Предложен способ оценки степени полимеризации бумажной изоляции, реализуемый измерением коэффициента отражения бумаги в видимом диапазоне длин волн с учётом влияния трансформаторного масла.

Ключевые слова: качество, степень полимеризации, старение, отражение, видимый диапазон, мониторинг.

Введение

Во многих случаях состояние активной части трансформаторов остаётся длительное время в удовлетворительном состоянии и не требует замены обмоток даже при сроках эксплуатации более 40 лет [1], а старение целлюлозной изоляции трансформаторов изменяется значительно и поэтому является одним из важнейших факторов при принятии решения о продлении эксплуатации, выводе в ремонт или замене.

Оценка степени полимеризации для контроля качества изоляции трансформаторов дает возможность точно определить механические свойства изоляции и ее износ в результате старения. Однако это на данный момент требует отбора проб твердой изоляции из наиболее нагретых частей обмотки трансформатора, что сопряжено со вскрытием бака, во многих случаях нежелательным и приводящим, в свою очередь, к простоям и недоотпуску электроэнергии. Используемые химические методы оценки степени полимеризации трудоемки и дорогостоящие [2].

В предложенном способе определения качества бумаги, а именно её степени полимеризации, таких недостатков нет. Определение качества бумаги в видимом диапазоне возможно не только на отдельно отобранных образцах изоляционной бумаги, но и на работающем оборудовании в режиме мониторинга. Электромагнитные поля не оказывают воздействия.

Методика получения и обработки экспериментальных данных

Для получения данной методики были взяты 8 образцов бумажной изоляции, степень полимеризации которых была определена в химической лаборатории.

В табл. 1 приведены значения степени полимеризации восьми образцов бумажной изоляции.

Визуально каждый образец отличался по цвету. Изменения в цвете подтвердили фотометрические измерения цветности образцов [3].

Далее были определены коэффициенты отражения излучения в видимом диапазоне длин волн для каждого из восьми образцов изоляционной бумаги.

Значения степени полимеризации восьми образцов бумажной изоляции

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Степень полимеризации	524	441	417	410	328	282	272	223

На рис. 1 отображены коэффициенты отражения в диапазоне длин волн [380 – 780] нм для каждого из восьми образцов изоляционной бумаги, степень полимеризации которых указана в табл. 1.

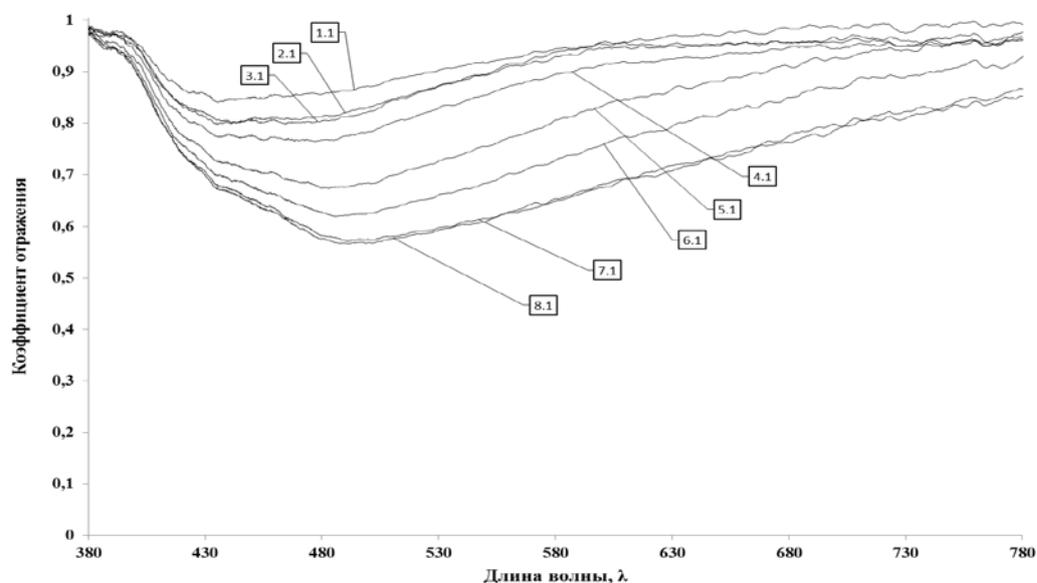


Рис. 1. Коэффициенты отражения восьми образцов бумажной изоляции

Построена корреляционная зависимость степени полимеризации и коэффициентов отражения (рис. 2).

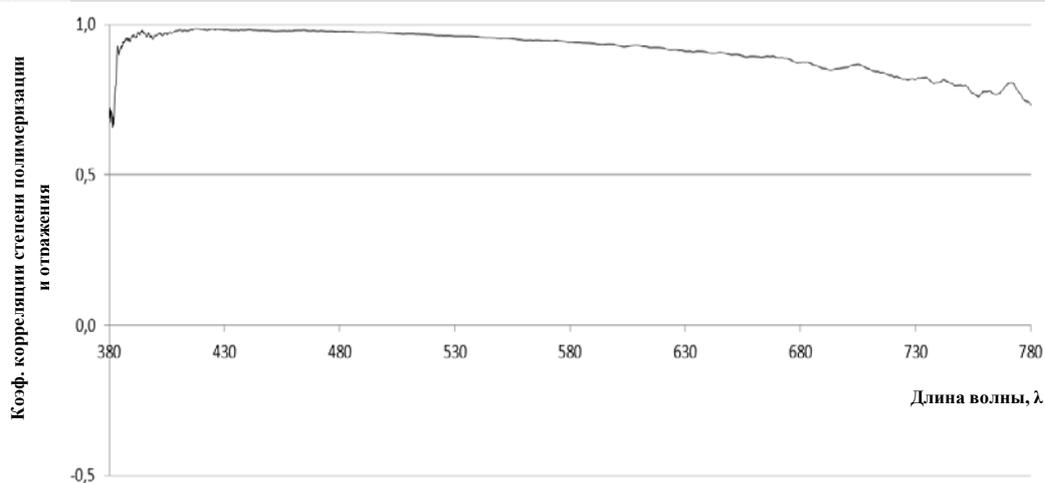


Рис. 2. Зависимость коэффициента корреляции и отражения в диапазоне длин волн [380 – 780] нм

По корреляционной зависимости вычислена длина волны с наибольшим коэффициентом корреляции. Наибольший коэффициент корреляции равен 0,99 и определяется на длине волны 418 нм.

Таким образом, степень полимеризации «чистой» (без масла) изоляционной бумаги нужно определять на длине волны 418 нм.

Однако известно, что изоляционная часть трансформаторного оборудования представляет собой не просто бумагу с высокой степенью полимеризации, а бумагу, пропитанную маслом. Масло, как и бумага, в процессе эксплуатации изменяет свои физико-химические свойства и, на первый взгляд, оказывает негативное влияние на определение степени полимеризации бумаги новым методом.

Для определения этого влияния измерили коэффициенты пропускания трансформаторных масел марки ГК, различных по сроку эксплуатации, в том же диапазоне длин волн, в которых измерялись коэффициенты отражения от образцов бумаги.

Предварительно были определены кислотные числа для каждого образца трансформаторного масла в химической лаборатории (табл. 2). По величине кислотного числа можно сделать заключение о степени старения трансформаторного масла и о возможности дальнейшей его эксплуатации в трансформаторе.

Таблица 2

Значения кислотного числа пяти образцов масел марки ГК

№ образца	1	2	3	4	5
Кислотное число	0,006	0,017	0,141	0,198	0,351

Как видно из табл. 2, образцу под номером 1 соответствует наилучшее значение качества.

На рис. 3 изображены коэффициенты пропускания различных по сроку эксплуатации пяти образцов трансформаторных масел, кислотные числа которых указаны в табл. 2.

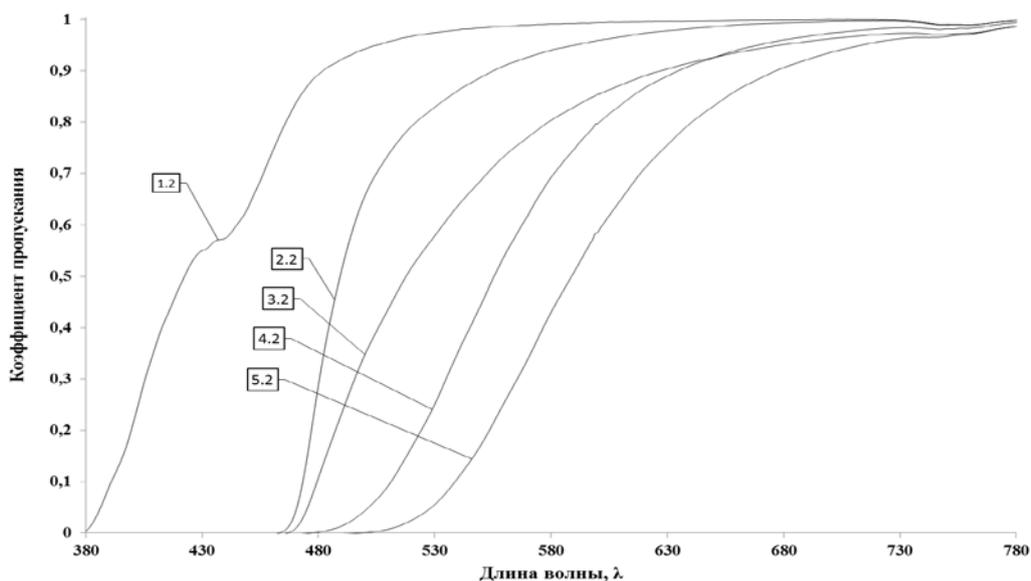


Рис. 3. Коэффициенты пропускания пяти образцов трансформаторных масел марки ГК

Известно, что с увеличением срока эксплуатации качество трансформаторного масла ухудшается. Соответственно кривая коэффициента пропускания сдвигается, сужая диапазон длин волн, пропускаемых в видимой области.

Далее исследуем систему бумажно-масляной изоляции. Зная характер изменения коэффициента отражения с уменьшением величины степени полимеризации каждого образца трансформаторной бумаги и зная характер изменения коэффициента пропускания для трансформаторного масла с изменением его качества, получаем систему, характеризующую бумажно-масляную изоляцию, состоящую из таких элементов, как коэффициент отражения бумаги и коэффициент пропускания масла.

На рис. 4 изображены коэффициенты пропускания масел и коэффициенты отражения бумаги на различных длинах волн.

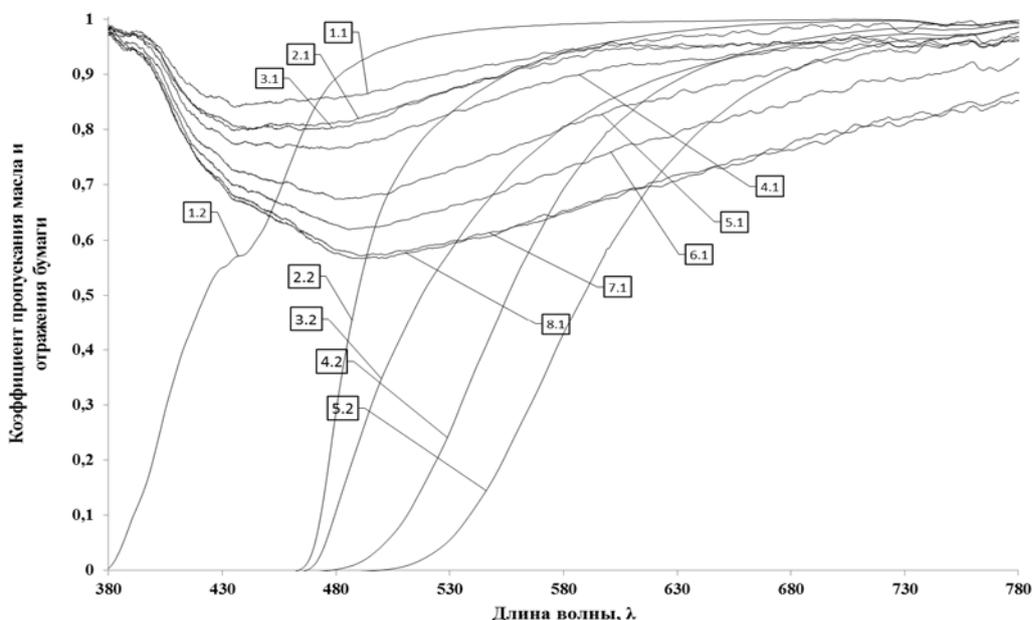


Рис. 4. Коэффициенты пропускания масел и отражения бумажной изоляции

Состояние масла в бумажно-масляной изоляции не постоянно, и в процессе эксплуатации оборудования масло подвергается периодически сливу и замене. Таким образом коэффициент пропускания масла будет различным в каждый период времени.

Существуют такие длины волн, которые чувствительны к физико-химическим свойствам трансформаторного масла незначительно и достаточны для определения коэффициента отражения от изоляционной бумаги, пропитанной маслом, обладающей различной степенью полимеризации.

Это такие длины волн, как 650 ÷ 655 нм. На этих длинах волн можно определять качество бумаги в бумажно-масляной изоляции независимо от свойств трансформаторного масла.

Также в ходе исследований была выведена характеристика поправки, применение которой позволяет определять качество бумажной изоляции на любой длине волны из диапазона [383-655] нм.

Для нахождения коэффициента отражения бумаги с учётом воздействия масла необходима следующая поправка:

$$R_{\text{б}} = \frac{R_{\text{бм}} - k \times T_{\text{м}}}{1 - k},$$

где $R_{\text{бм}}$ – измеренный коэффициент отражения бумажно-масляной изоляции; k – измеренный коэффициент непрозрачности масла; $T_{\text{м}}$ – коэффициент пропускания масла.

Коэффициент непрозрачности масла – это коэффициент, зависящий от коэффициента пропускания масла.

Таким образом, применение поправки предполагает контроль качества трансформаторного масла через коэффициент пропускания и контроль качества бумажной составляющей изоляции с помощью коэффициента отражения. Длина волны света испускаемого узконаправленного источника должна находиться в диапазоне [383-655] нм.

Выводы

Полученные результаты исследований позволяют определять качество бумажно-масляной изоляции, а именно степень полимеризации бумажной составляющей, на любой, с учётом поправки, длине волны из диапазона [383–655] нм или на длине волны 655 нм без введения поправки. Установлено, что степень полимеризации изоляционной бумаги без масла нужно определять на длине волны 418 нм.

Summary

The aging of paper-oil insulation is determined by changing the value of its degree of polymerization. Used today ways to assess the degree of polymerization of paper-oil insulation of high voltage equipment has the following disadvantages: labor input and long-time produce a result, the high cost analysis, environmental pressures, the complexity and high cost of automation.

We propose a method of estimating the degree of polymerization of the paper insulation implemented by measuring the reflectance of paper in the visible wavelength range, taking into account the effect of transformer oil.

Литература

1. Кузьмин О.А. Современные методы диагностики силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. Екатеринбург, 2010.
2. ГОСТ 25438-82. Целлюлоза для химической переработки. Методы определения характеристической вязкости. Государственный комитет СССР по стандартам. М.
3. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию

28 января 2015 г.

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел:8(843)519-42-71.

Сабитов Айдар Хайдарович – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(917)2203673. E-mail: sabitov_ah@mail.ru.

Низамутдинов Булат Рависович – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(927)0408291.