

УДК 621.315

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Целью работы является разработка метода определения эксплуатационных характеристик (кислотное число, тангенс угла диэлектрических потерь) трансформаторного масла спектральным способом, используя связь цвета и длины волны с учетом статистических зависимостей. Поставленная цель достигается за счет решения следующей задачи: получения спектров свечения образцов трансформаторного масла и построения двух статистических зависимостей для определения кислотного числа и тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) масла. Наиболее существенным результатом статьи является установление зависимости  $tg\delta$  от положения максимума в спектре люминесценции масла и положения максимума в спектре рассеяния масла и кислотного числа от образца. Значимость полученных результатов состоит в том, что спектральный метод определения кислотного числа и тангенса угла диэлектрических потерь масла с помощью построенных статистических прямых не требует использования дополнительных спектральных приборов, а связь цвета и длины волны в спектрах люминесценции и рассеяния позволяет определять эти параметры визуально, наблюдая образцы масла при освещении их белым светом по цвету соответствующих участков свечения масла, что возможно наблюдать без отбора проб масла непосредственно в баке трансформатора.

АВТОРЫ:

Козлов В.К.,  
Валиуллина Д.М.,  
ФГБОУ ВО КГЭУ

Гиниатуллин Р.А.,  
КНИТУ

Ключевые слова:  
#трансформаторное  
масло; #кислотное  
число; #тангенс угла  
диэлектрических  
потерь.

## Введение

Одним из наиболее распространенных электрических устройств, применяемых в электроэнергетике, является силовое маслонаполненное оборудование. В процессе эксплуатации маслонаполненного оборудования ухудшаются электроизоляционные свойства трансформаторного масла (ТМ), происходит его «старение». Во избежание серьезных аварий необходимо своевременно контролировать состояние трансформаторного масла. Основные показатели, характеризующие состояние трансформаторного масла, — это: пробивное напряжение (Uпр), кислотное число (КЧ), тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ), влагосодержание, газосодержание, снижение температуры вспышки, определение наличия растворенного шлама.

Определение этих характеристик требует отбора проб трансформаторного масла, использование дополнительных приборов, реагентов и сложных вычислений [1–10], что вызывает разработку новых методов, исключающих вышеописанные трудности [11–23].

Целью исследования является разработка метода определения кислотного числа масла и тангенса угла диэлектрических потерь масла, позволяющего без использования дополнительных приборов, реагентов и сложных вычислений оценить эти параметры.

Определение характеристик трансформаторного масла и их изменения в процессе эксплуатации возможно проводить визуальным способом согласно методике, предложенной авторами в [24]. Для корректной

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Таблица 1

№ п/п	$t$ всп	Кислотное число (КОН)	Содержание водорасстворимых кислот	$tg\delta$ , 70°	$tg\delta$ , 90°	Uпр, кВ	Класс чистоты	Объект забора масла	Белый начало, $\lambda$ <i>max</i>	Белый середина, $\lambda$ <i>max</i>
1	136	0,045	0,004	2,34	3,09	58	8	Ввод БМВ-110 кВ	490	550
2	135	0,093	0,019	5,46	6,99	52	9	Ввод БМВ-110 кВ	570	610
3	136	0,046	0,007	2,78	4,63	58,3	8	Ввод БМВ-110 кВ	520	575
4	136	0,089	0,021	4,73	6,09	76,3	7	Ввод БМВ-110 кВ	570	590
5	141	0,099	0,021	3,94	8	68,6	8	ТТ-110 кВ	570	615
6	143	0,023	0,002	1,23	2,15	77	6	ТМН-35/10 кВ	490	510
7	141	0,058	0,009	2,15	3,03	39,3	10	ТМН-35/10 кВ	530	600
8	135	0,085	0,017	4,09	6	69,6	7	Ввод БМВ-110 кВ	575	610
9	135	0,093	0,017	4,86	9,09	67,3	8	Ввод БМВ-110 кВ	590	610
10	137	0,035	0,003	1,84	2,75	74,3	6	ТМ-400/10 кВ	520	560
11	135	0,087	0,018	4,26	7,09	56	9	Ввод БМВ-110 кВ	580	610
12	141	0,034	0,002	2,42	3,5	68	6	ТМН-35/10 кВ	510	510
13	135	0,088	0,019	4,18	7,61	62	7	Ввод БМВ-110 кВ	610	625
14	135	0,084	0,015	3,46	5,5	49	9	Ввод БМВ-110 кВ	560	590

расшифровки фотографий в предлагаемой работе проводится фотографирование образцов масел с параллельным измерением спектров свечения различных участков исследуемого масла.

## Методы, результаты

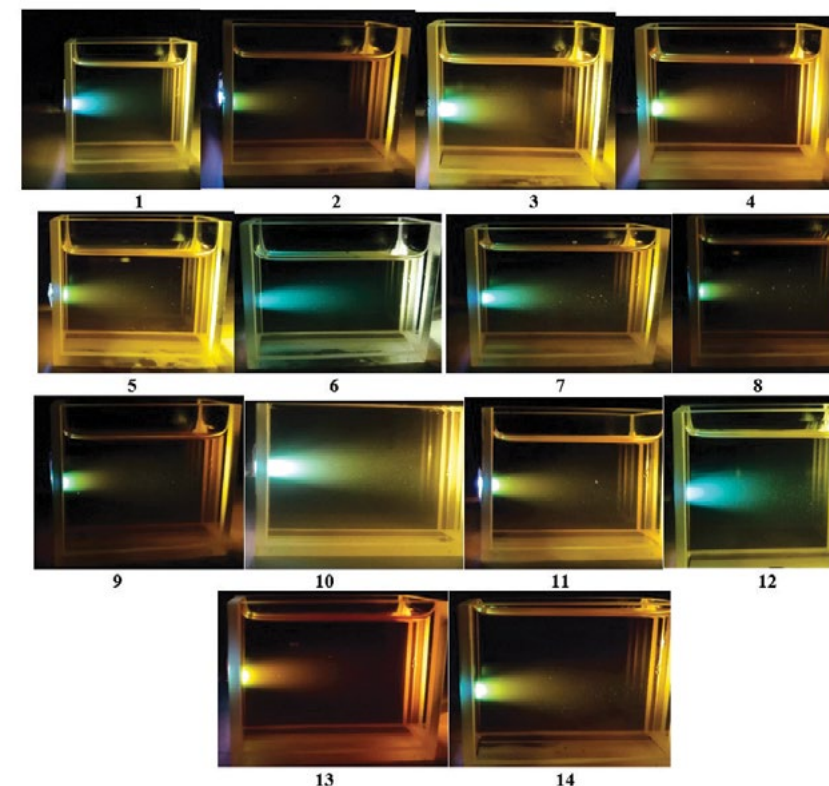
Для проведения экспериментальных исследований были отобраны образцы масла из работающего оборудования «Казанских электрических сетей» и в их химической лаборатории определены характеристики качества этих образцов, которые приведены в таблице 1.

На рис. 1 приведены фотографии масел в кювете размером 50 мм при облучении источником белого света с линией накачки на длине волны 447 нм. Облучение производилось с левой стороны кюветы.

Спектры свечения масла регистрировались с помощью малогабаритного спектрометра Avantes с оптоволоконным кабелем.

ФОТОГРАФИИ КЮВЕТЫ С МАСЛОМ, НОМЕР ФОТОГРАФИИ СООТВЕТСТВУЕТ НОМЕРУ ОБРАЗЦА В ТАБЛИЦЕ 1

Рис. 1



СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 4, № 5, № 13, № 14, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В НАЧАЛЕ КЮВЕТЫ

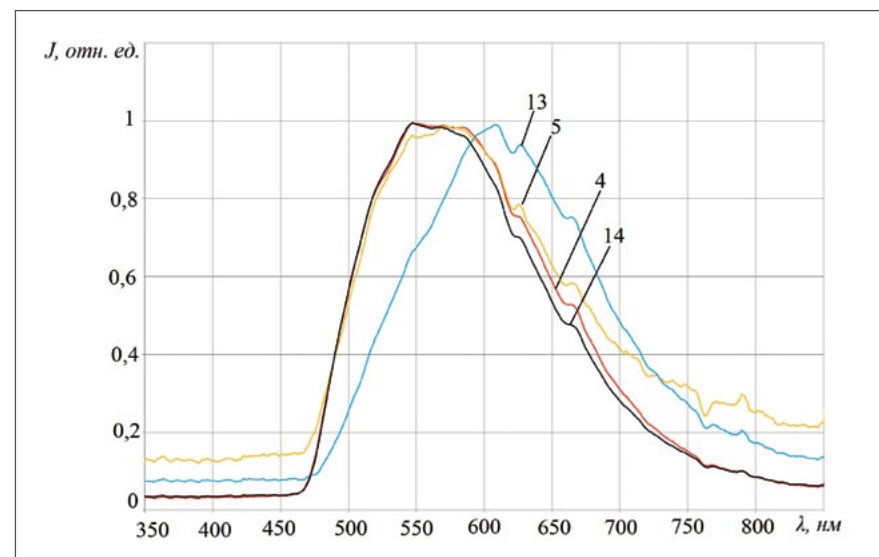


Рис. 2

Основные физико-химические характеристики исследуемых образцов масел, приведенных на рис. 3, следующие: № 1 — КЧ = 0,045,  $tg\delta = 3,09$ ; № 3 — КЧ = 0,046,  $tg\delta = 4,63$ ; № 6 — КЧ = 0,023,  $tg\delta = 2,15$ ; № 7 — КЧ = 0,058,  $tg\delta = 3,03$ ; № 10 — КЧ = 0,035,  $tg\delta = 2,75$ ; № 12 — КЧ = 0,034,  $tg\delta = 3,5$ .

Основные физико-химические характеристики исследуемых образцов масел, приведенных на рис. 4, следующие: № 2 — КЧ = 0,093,  $tg\delta = 6,99$ ; № 8 — КЧ = 0,085,  $tg\delta = 6$ ; № 9 — КЧ = 0,093,  $tg\delta = 9,09$ ; № 11 — КЧ = 0,087,  $tg\delta = 7,09$ .

На рис. 5, 6, 7 приведены спектры свечения образцов масла, полученные с области масла в середине кюветы и для восприятия разделенные на несколько образцов, объединенных близостью максимумов свечения.

Из спектров, приведенных на рис. 2–7, определили максимум в спектрах (таблица 2) и построили статистическую зависимость между параметрами образцов масел и максимумами в спектрах свечения. Коэффициент корреляции при нормально распределенных данных обеих выборок и с учетом поправок, обусловленных малым числом наблюдений, ( $R = 0,90$ ) получен между положением максимума в спектрах в начале кюветы и  $tg\delta$  (рис. 8), а также между положением максимума в спектрах в середине кюветы и кислотным числом (КЧ) ( $R = 0,88$ ) (рис. 9). Остальные статистические связи отсутствуют.

**Обсуждение**

С учетом механизмов деградации трансформаторных масел [24], имея зависимости (рис. 8, 9), можно по спектрам определять параметры трансформаторных масел. При этом  $tg\delta$  обусловлен ростом концентрации ароматических соединений и изменением их молекулярного состава в сторону удлинения цепочки из бензольных ядер, а рост кислотного числа обусловлен ростом как концентра-

СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 1, № 3, № 6, № 7, № 10, № 12, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В НАЧАЛЕ КЮВЕТЫ

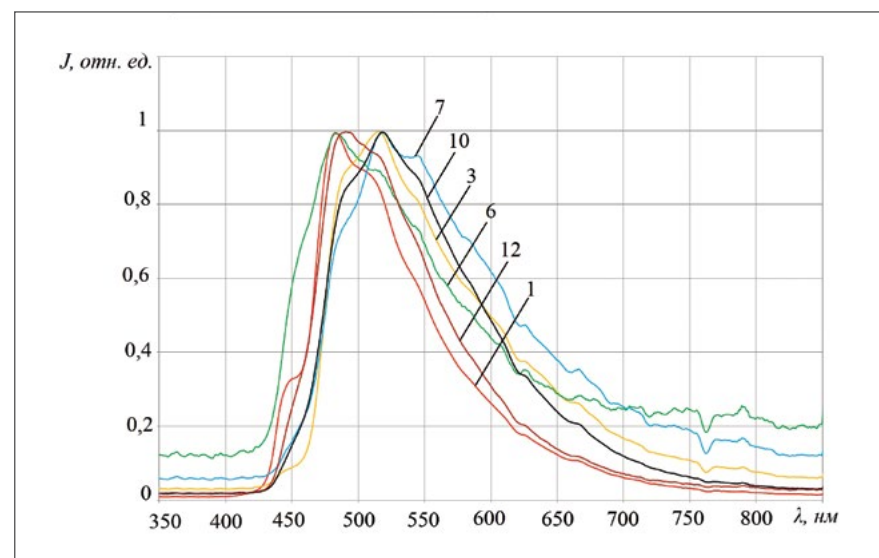


Рис. 3

На рис. 2, 3, 4 приведены спектры свечения образцов масла, полученные с области масла в начале кюветы и для восприятия разделенные по несколько образцов, объединенных близостью максимумов свечения.

Основные физико-химические характеристики исследуемых образцов масел, приведенных на рис. 2, следующие: № 4 — КЧ = 0,089,  $tg\delta = 6,09$ ; № 5 — КЧ = 0,099,  $tg\delta = 8$ ; № 13 — КЧ = 0,088,  $tg\delta = 7,61$ ; № 14 — КЧ = 0,084,  $tg\delta = 5,5$ .

СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 2, № 8, № 9, № 11, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В НАЧАЛЕ КЮВЕТЫ

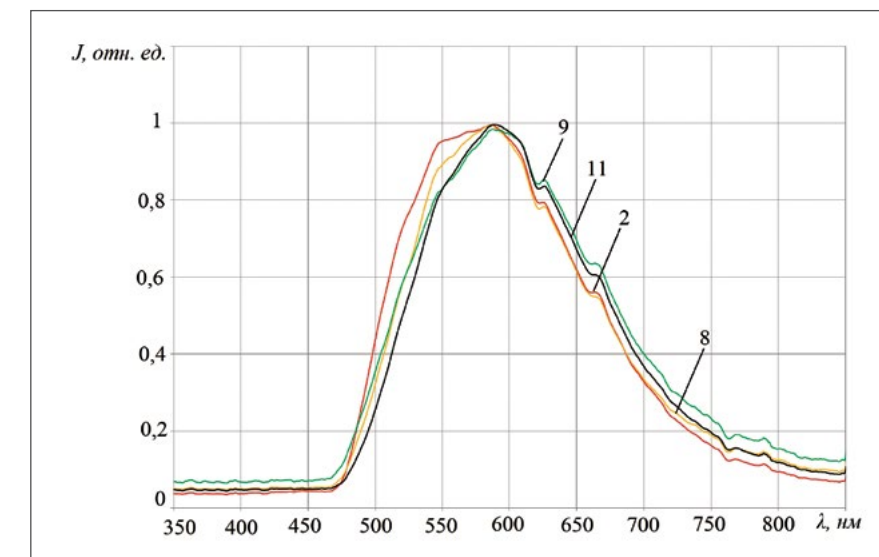


Рис. 4

ции, так и размеров рассеивающих частиц, состоящих из продуктов старения масла.

Согласно общим соображениям, изложенным в [24], в перпендикулярном к облучающему излучению направлении наблюдается рассеянное на частицах масла Рэлеевское излучение и люминесценция молекул ароматических соединений в составе масла. В прошедшем излучении наблюдается спектр источника облучения с добавлением излучения люминесценции, ослабленный за счет Рэлеевского рассеяния на частицах масла и молекулярного поглощения, обусловленного молекулами, входящими в состав масла.

Трансформаторные масла состоят из парафинов, нафтенов и ароматических соединений с количеством атомов углерода не более 25. Из этих соединений в видимой области спектра поглощают только ароматические соединения, и лишь они могут влиять на спектральные характеристики трансформаторных масел в видимой области спектра.

Таким образом, в области начала кюветы наблюдается люминесценция ароматических соединений, входящих в состав масла и изменяющихся в процессе старения.

Согласно [12] начало спектра поглощения молекул углеводорода тем больше смещено в область больших длин волн, чем больше конденсированных бензольных ядер содержит молекула. Эта зависимость четко проявляется у ряда молекул с линейным присоединением колец. При угловом расположении ядер такой однозначной зависимости не наблюдается. В ряду аценов бензол — нафталин — антрацен — нафтацен — пентацен — гексацен частоты переходов уменьшаются при добавлении бензольного кольца в среднем на  $5000\text{ см}^{-1}$  и составляют соответственно 264 нм, 315 нм, 381 нм, 473 нм, 575 нм и 693 нм.

СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 4, № 5, № 13, № 14, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В СЕРЕДИНЕ КЮВЕТЫ

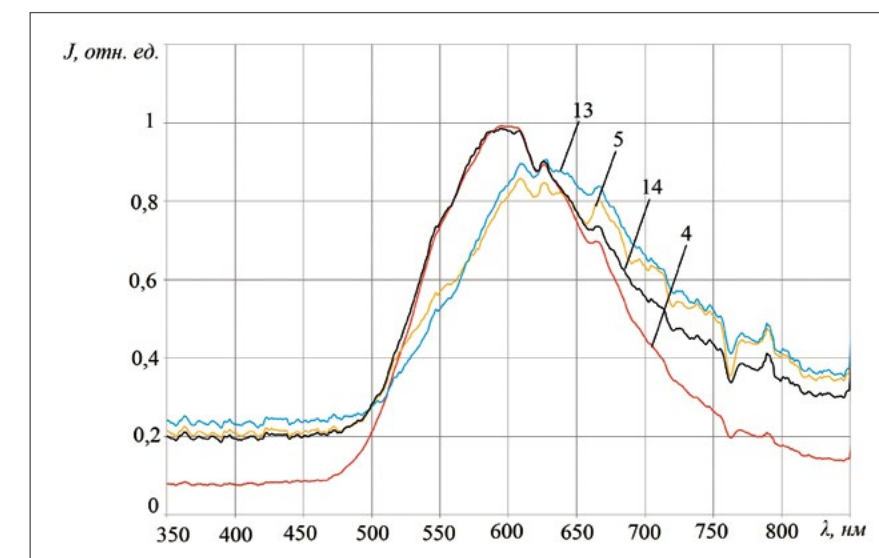


Рис. 5

Для ряда орто- и пери-конденсированных соединений, таких как фенантрен, 1,2 бензантрацен, перилен, хризен, частоты переходов меняются следующим образом: 346 нм, 384 нм, 440 нм, 359 нм соответственно.

Спектры люминесценции ароматических молекул расположены зеркально-симметрично со спектрами поглощения этих соединений, а значит, в процессе старения масла согласно [12] его свечение будет

СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 1, № 3, № 6, № 7, №10, № 12, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В СЕРЕДИНЕ КЮВЕТЫ

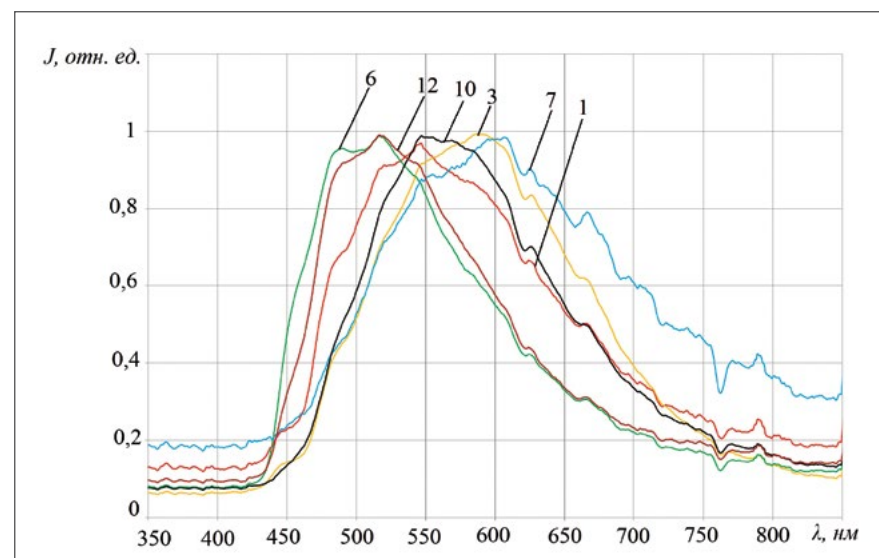


Рис. 6

слабее рассеяния на частицах и его практически невозможно наблюдать на фоне Рэлеевского рассеяния частицами [24].

Интенсивность света ( $I_p$ ), рассеянного под прямым углом, описывается уравнением:

$$I_p = 24\pi^3 \cdot \left( \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + 2 \cdot n_1^2} \right)^2 \cdot \frac{vV^2}{\lambda^4} \cdot I_0$$

где  $v$  — концентрация частиц в единице объема системы;

$V$  — объем частицы;

$n_1, n_2$  — показатели преломления чистого ТМ и материала частиц соответственно;

$I_0$  — интенсивность падающего света и работает для дисперсных систем, в которых частицы не поглощают свет, не окрашены и имеют сферическую форму, не проводят электрический ток, малы по сравнению с  $\lambda$  падающего света (не более  $0,1 \cdot \lambda$ ) и удалены друг от друга на достаточно большие расстояния. В трансформаторном масле присутствуют разные частицы (с широким спектром размеров и формы). С увеличением размера частиц показатель степени  $\lambda$  снижается от 4 до 2. В системах, где размер частиц становится несколько больше длины волны (показатель достигает 2), рассеянный свет становится белым. Когда же размер частиц значительно превышает  $\lambda$  (показатель равен 0), светорассеяние переходит в отражение света, не зависящее от  $\lambda$ . Частицы, проводящие электрический ток, относятся к поглощающим частицам, и тем самым они не принимают участие в рассеянии света.

На рис. 10 приведен видимый спектр и указаны длины волн в зависимости от цвета излучения.

Таким образом, имея изображение масла (фото на рис. 1), используя связь цвета и длины волны (рис. 10), с учетом статистических зависимостей

СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ № 2, № 8, № 9, № 11, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ С ОБЛАСТИ МАСЛА В СЕРЕДИНЕ КЮВЕТЫ

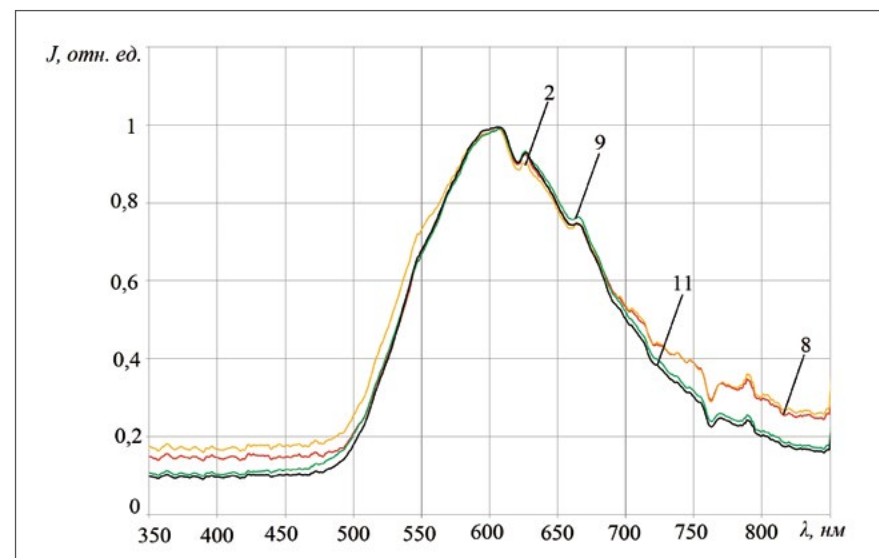


Рис. 7

смещаться в сторону больших длин волн.

В области середины кюветы наблюдается рассеянное излучение на коллоидных частицах (продук-

тах старения) трансформаторного масла.

Следует отметить, что молекулярное рассеяние света, всегда присутствующее в жидкостях, существенно

ПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ СПЕКТРОВ СВЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Таблица 2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Белый начало, $\lambda_{max}$	490	570	520	570	570	490	530	575	590	520	580	510	610	560
Белый середина, $\lambda_{max}$	550	610	575	590	615	510	600	610	610	560	610	510	625	590

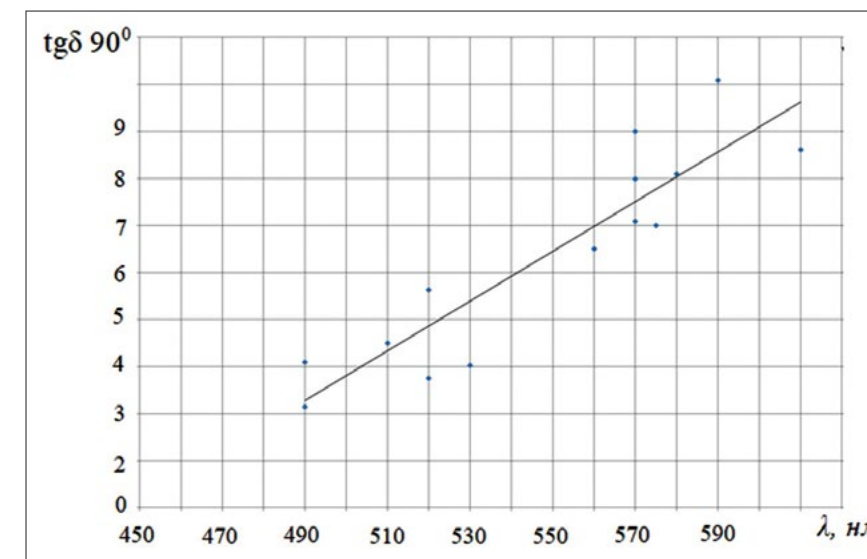
(рис. 8 и рис. 9), можно определять кислотное число масла и тангенс угла диэлектрических потерь, визуально наблюдая образцы масла при освещении их белым светом по цвету соответствующих участков свечения масла.

### ■ Заключение

1. Выявлена статистическая зависимость положения максимума в спектре люминесценции масла и тангенса угла диэлектрических потерь масла.
2. Разработан метод определения тангенса угла диэлектрических потерь масла с помощью спектров люминесценции при возбуждении масла светом белого светодиода, что существенно упрощает процесс исследования и определения качества изоляции и возможность определения непосредственно в баке трансформатора без предварительного отбора проб масла.
3. Выявлена статистическая зависимость положения максимума в спектре рассеяния трансформаторного масла и кислотного числа масла.
4. Разработан метод определения кислотного числа масла с помощью спектров рассеяния видимого излучения при освещении масла светом белого светодиода, который не требует дополнительных приборов и реагентов.
5. Имея изображение масла и связь цвета с длиной волны, с учетом полученных в работе статистических зависимостей, предложено

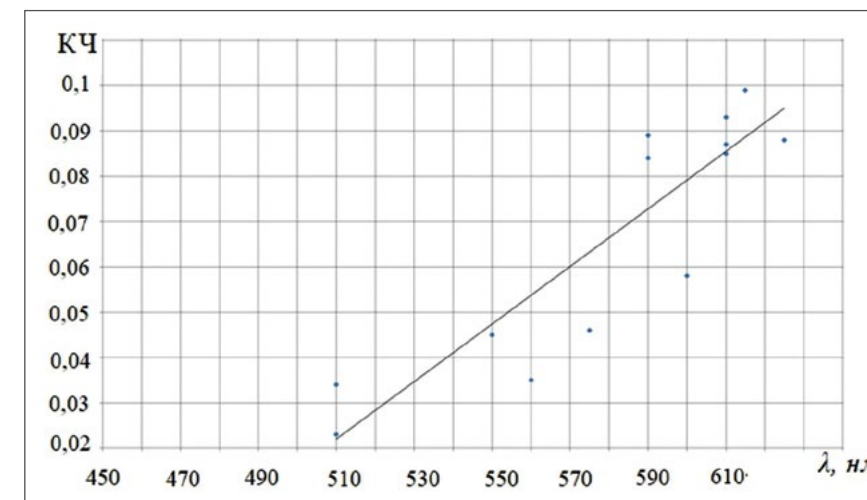
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ( $R = 0,90$ ) МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЕМ МАКСИМУМА В СПЕКТРАХ СВЕЧЕНИЯ МАСЛА В НАЧАЛЕ КЮВЕТЫ И ТАНГЕНСОМ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ МАСЛА

Рис. 8



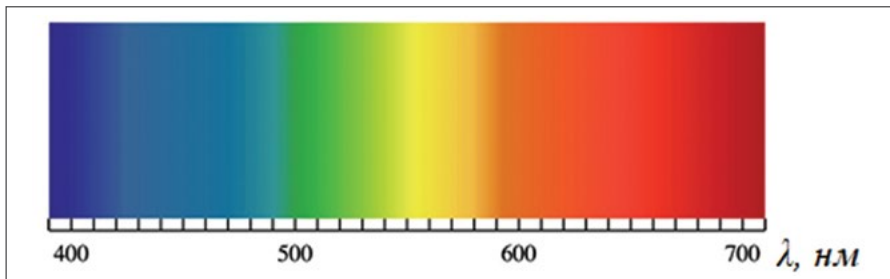
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ( $R = 0,88$ ) МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЕМ МАКСИМУМА В СПЕКТРАХ СВЕЧЕНИЯ МАСЛА В СЕРЕДИНЕ КЮВЕТЫ И КИСЛОТНЫМ ЧИСЛОМ ОБРАЗЦОВ МАСЕЛ

Рис. 9



ВИДИМЫЙ СПЕКТР

Рис. 10



проводить оценку кислотно-го числа масла и тангенса угла диэлектрических потерь, визуально наблюдая образцы масла при освещении их белым светом по цвету соответствующих участков свечения масла.

- Предложенные методы могут быть реализованы с помощью оптико-волоконного кабеля непосредственно на баке трансформатора без отбора проб в реальном масштабе времени.

Работы в этом направлении будут продолжены.

ЛИТЕРАТУРА:

- Черножуков Н.И., Крейн С.Э. Окисляемость минеральных масел. Москва, 1955. 371 с.
- Martins M., Augusta G., Gomes A.R. Comparative Study of the Thermaldegradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper. IEEE Elec. Insul. Mag., 2012. Vol. 28. № 2. pp. 22–28.
- Wilson A.C.M. Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and properties. London, 1980. 221 p.
- Meshkatoddini M.R. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008. Vol. 1. pp. 384–388. DOI: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
- Saruhashi Daisuke, Bin Xiang, Zhiyuan Liu, Yanabu Satoru. Thermal Degradation Phenomena of Flame Resistance Insulating Paper and Oils. IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul., 2013. Vol. 20. № 1. pp. 122–127.

- Miners K. Particles and Moisture Effect on Dielectric Strength of Transformer Oil Using VDE Electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982. Vol. 101. № 3. pp. 751–756. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317291.
- 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. № 6. pp. 7–13.
- 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. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2015. Vol. 22. № 2. pp. 1275–1282.
- 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.
- ГОСТ 2477–65. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. Москва: Стандартиформ публ., 2004. 6 с.
- Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
- Нурмухаметов Р.Н. Поглощение и люминесценция ароматических соединений. М.: Химия, 1971. 216 с.
- Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013. Vol. 20. № 1. pp. 346–355.
- Dumitran L.M., Setnescu R., Notingher P.V., Badicu L.V., Setnescu T. Method for lifetime estimation of power transformer mineral oil. London: JournalFuel, 2014. Vol. 117. pp. 756–762. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.002.
- Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П., Харлампиди Е.Е. Вестник диэлектрических характеристик

углеводородного трансформаторного масла // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 14. С. 53–55.

- Айзстраутс Э.В., Мункевице М.Э. tgδ как показатель качества изоляционных масел // Электрические станции. 1985. № 1. С. 69–72.
- Майоров А.В., Львов М.Ю., Кулюхин С.А. Оценка технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше. Москва: Издательство журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», 2022. 128 с.
- Fofana I., Borsi H., Gochenbach J. Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor condition. IEEE Trans, on Dielec. and Electric. Insulat, 2001. Vol. 8. № 6. pp. 1040–1047.
- Abu Bakar N., Abu-Siada A. A novel method of measuring transformer oil interfacial tension using UV-Vis spectroscopy. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016. Vol. 32. № 1. pp. 7–13. DOI: 10.1109/MEI.2016.7361098.
- Alshehawy A.M., Mansour D.E.A., Ghali M., Lehtonen M., Darwish M.M.F. Photoluminescence spectroscopy measurements for effective condition assessment of transformer insulating oil. Processes, 2021. Vol. 9. № 5.
- Hasnul Hadi M.H., Ker P.J., Lee H.J., Leong Y.S., Hannan M. A, Jamaludin M.Z., Mahdi M.A. Color Index of Transformer Oil: A Low-Cost Measurement Approach Using Ultraviolet-Blue Laser. Sensors (Basel), 2021. Nov. 2;21 (21):7292. DOI: 10.3390/s21217292. PMID: 34770602; PMCID: PMC8587144.
- Alshehawy A., Mansour D.E., Ghali M., Lehtonen M., Darwish M. Photoluminescence Spectroscopy Measurements for Effective Condition Assessment of Transformer Insulating Oil. Processes. 2021. № 9:732. DOI: 10.3390/pr9050732.
- Alshehawy A.M., Mansour D.-E.A., Ghali M., Rezk A. Evaluating the impact of aging in field transformer oil using optical spectroscopy techniques: proceedings of the 2017. IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK. 2017. pp. 1–4.
- Козлов В.К., Валиуллина Д.М., Туранова О.А., Туранов А.Н. Механизм деградации трансформаторных масел // Электрические станции. 2022. № 2 (1087). С. 41–44.

Для цитирования: Козлов В.К., Валиуллина Д.М., Гиниатуллин Р.А. Определение характеристик качества трансформаторного масла спектральным методом // Энергия единой сети. 2023. № 5–6 (71). С. 72–78.