



УДК 620.1: 621.315.615.2

## КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Д.М. Валиуллина, Ю.К. Ильясова, В.К. Козлов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

valiullinadiliya@mail.ru, beautiful\_nut@mail.ru, vk\_kozlov@bk.ru

**Резюме:** В данной работе предложен простой наглядный качественный метод анализа в диагностике трансформаторных масел, который не требует дорогостоящего оборудования и на начальном этапе позволяет определить природу и степень старения масла.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, спектральный анализ, степень старения, кислотное число, коллоидные частицы, люминесценция.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-87-92.

**Для цитирования:** Валиуллина Д.М., Ильясова Ю.К., Козлов В.К. Качественные методы спектрального анализа в диагностике трансформаторных масел // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 87-92. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-87-92.

## QUALITATIVE METHODS OF SPECTRAL ANALYSIS IN DIAGNOSTICS OF TRANSFORMER OILS

D.M. Valiullina, J.K. Ilyasova, V.K. Kozlov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

valiullinadiliya@mail.ru, beautiful\_nut@mail.ru, vk\_kozlov@bk.ru

**Abstract:** In this paper, we offer a simple, intuitive, qualitative method for analyzing in diagnosing transformer oils, which does not require expensive equipment and at the initial stage allows us to determine the degree of oil aging.

**Keywords:** transformer oil, spectral analysis, degree of aging, acid number, colloidal particles, luminescence.

**For citation:** D.M. Valiullina, J.K. Ilyasova, V.K. Kozlov. Qualitative methods of spectral analysis in diagnostics of transformer oils. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp. 87-92. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-87-92.

### Введение

Особенностью развития электроэнергетики в настоящее время является применение последних достижений науки, современных технологий и материалов.

Базовым элементом электроэнергетики являются силовые трансформаторы, объемной составной частью которых является трансформаторное масло. Трансформаторное масло – специфический углеводородный продукт, на который возложены основные функции по изоляции и отводу тепла от обмоток электрических машин в окружающую среду. Такие функции трансформаторного масла требуют особого внимания и подхода к условиям его эксплуатации [1–3].

В процессе эксплуатации жидкий диэлектрик подвергается воздействию высокой напряженности электрического и температурного полей, а также находится в непрерывном контакте с конструктивными элементами трансформатора. Это ускоряет старение жидкого диэлектрика, вызывает изменение его физико-химического состава, в результате чего продукты старения, в свою очередь, способствуют ухудшению его электроизоляционных свойств [4–9].

Старение трансформаторного масла определяет надежность трансформатора, поэтому без модернизации методов контроля состояния трансформаторного масла обеспечить безаварийную работу электроэнергетики невозможно, что подчеркивает актуальность поставленной задачи.

Деградация трансформаторного масла в процессе эксплуатации идет по трем направлениям: окисление масла (увеличение кислотного числа), образование коллоидных частиц и увеличение концентрации ароматических соединений [6–8].

Наиболее простыми, с точки зрения проведения измерений, а также более информативными являются методы спектроскопии. Анализ методом спектроскопии в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне более быстрый, простой и точный. Измеренные спектры могут дать информацию как о физических свойствах масла, так и о структурно-групповом составе трансформаторного масла [4, 10, 11, 12].

Целью работы является разработка методов контроля состояния трансформаторного масла для оценки его эксплуатационных свойств, определения структурно-группового состава и мониторинга процессов регенерации при ремонте трансформатора посредством спектрального анализа масла в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне.

Для проведения исследовательских работ взяты образцы трансформаторного масла марки ГК (2007 года выпуска, ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», класс II А, ТУ 38.101.1025–85) с различным значением кислотного числа (до фильтрации и после). Для фильтрации масла использовалась фильтровальная бумага типа Ф ГОСТ 12026-76 (фильтрации сорности – число соринки на  $1\text{ м}^2$ ). Наличие коллоидных частиц и ароматических соединений определялись спектральными методами и представлены в работах [10–12].

Каждый образец масла, помещенный в кварцевую кювету и поочередно освещенный узконаправленным светом различной длины волны, наблюдался визуально. Источником освещения являлись лазерные указки (с белым, красным и зеленым светом). Температура комнаты, в которой находились кюветы, равна  $26^\circ\text{C}$ .

#### **Результаты опыта и их обсуждение**

При освещении этих образцов масел узконаправленным светом длиной волны ( $\lambda \approx 650\text{ нм}$ ), соответствующей красной области спектра, в пробах масел с меньшим кислотным числом луча рассеяния не наблюдается, так как нет крупных коллоидных частиц (пробы масел №1, №2, №3) (рис.1). С увеличением дегградации масла, наоборот, наблюдается появление красного луча рассеяния, который становится наиболее интенсивным в более «грязных» образцах масел (пробы масел №4 и №5) (рис.1). Это свидетельствует о том, что чем «грязнее» трансформаторное масло, тем крупнее и больше коллоидные частицы, присутствующие в нем, тем красный луч рассеяния интенсивнее. Причем размер коллоидных частиц соизмерим с длиной волны красного света.

При освещении зеленым светом ( $\lambda \approx 530\text{ нм}$ ) чистого неотфильтрованного масла (проба №1) появляется желто-зеленый нечеткий луч рассеяния (рис. 2). При освещении этого же образца масла (проба №1), но после фильтрации луч приобретает желтый свет. Это говорит о том, что с помощью фильтровальной бумаги убрали частицы, на которых

происходило рассеяние. В этом случае можно наблюдать пучок желтого света – явление люминесценции.

Увеличение интенсивности люминесценции при заданных параметрах может свидетельствовать о количественном содержании люминесцирующих веществ, т.е. их концентрации в образце масла. А сдвиг максимума излучения люминесценции может свидетельствовать о качественных изменениях (рис. 3).

Это говорит о том, что в масле присутствуют молекулы ароматических соединений. С увеличением степени старения трансформаторного масла (пробы № 2, №3) люминесценция становится выраженной и интенсивной, что свидетельствует о большом количестве ароматических соединений (рис. 2). В трансформаторных маслах с наибольшей степенью окисления (пробы №4 и №5) помимо ароматических соединений появляются и коллоидные частицы; на фотографиях проб масел №4 и №5 явление люминесценции присутствует, но не столь выражено (размыто), как на образцах №2 и №3, но наблюдается рассеяние (рис. 2). Таким образом, зеленое излучение коллоидными частицами рассеивается, а желтое становится слабее (люминесценция возбуждается слабее).

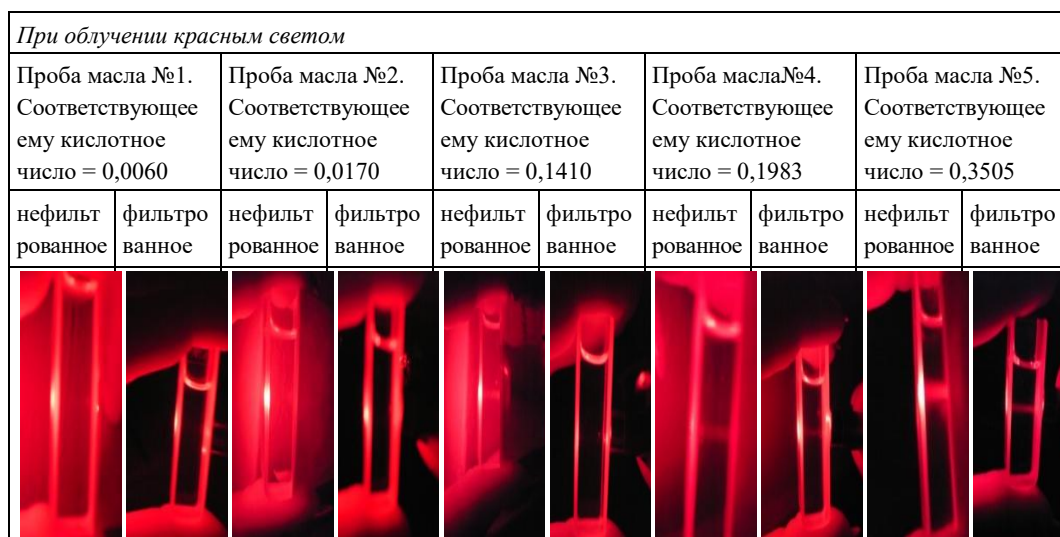


Рис. 1. При облучении красным светом

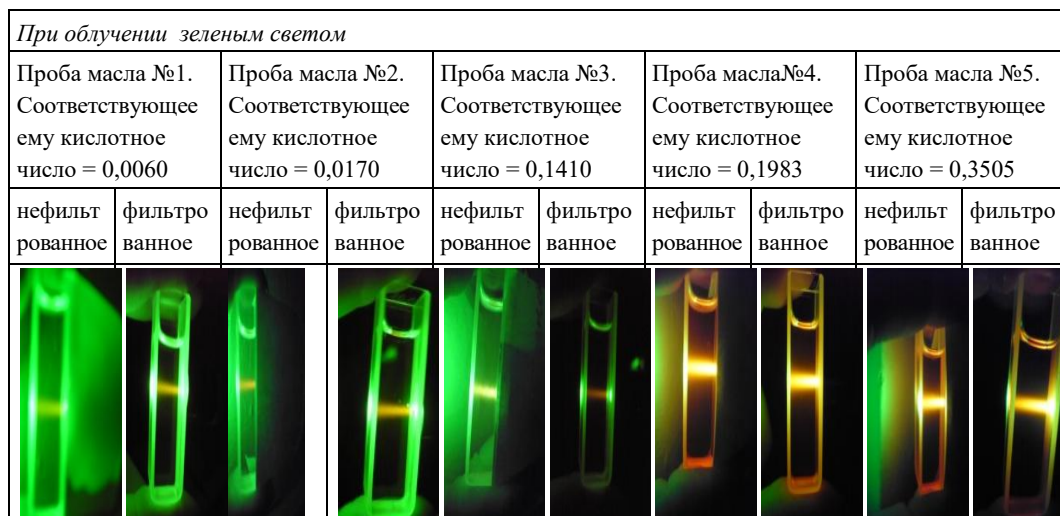


Рис. 2. При облучении зеленым светом

При освещении этих образцов масел узконаправленным белым светом ( $\lambda \approx 400-800$  нм), который является электромагнитным излучением сложного спектрального состава, видно, что масло с малым значением кислотного числа (чистое масло) имеет ярко-голубой цвет рассеяния (проба масла №1) (рис. 4), причем он наиболее выражен в отфильтрованном образце. Это свидетельствует о том, что в отфильтрованном образце крупных частиц, на которых происходит рассеяние, нет. При освещении таким же белым светом образцов №2 и №3 цвет луча рассеяния изменяется и становится желтеет, что свидетельствует о том, что данные пробы масла более окислены и в них присутствуют коллоидные частицы и ароматические соединения (рис.4). При освещении пробы масла №4 явно виден ярко-желтый луч. Это свидетельствует о том, что проба масла №4 обладает большей степенью окисления, в ней присутствует значительное количество крупных коллоидных частиц и ароматических соединений, т.е. имеет место и явление рассеяния на коллоидных частицах, и явление люминесценции молекул ароматических соединений (рис.4). При освещении неотфильтрованного образца №5 (кислотное число которого больше, чем кислотное число образцов №1, №2, №3 и №4) белым светом, луч рассеяния практически не наблюдается, т.к. белый свет практически полностью поглощается. После фильтрации пробы масла №5 появляется ярко-оранжевый луч рассеяния, свидетельствующий о наличии коллоидных частиц (рис.4).

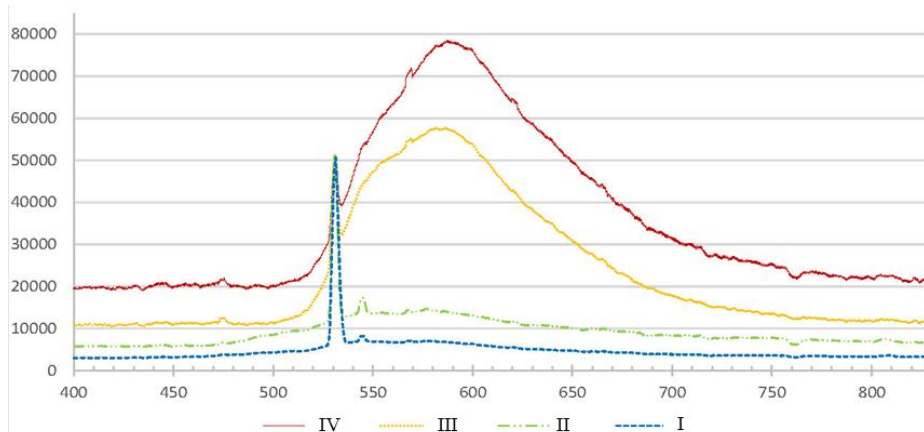


Рис. 3. Спектры возбуждения и люминесценции 3-х проб масел №1, №3 и №5

При облучении белым светом									
Проба масла №1. Соответствующее ему кислотное число = 0,0060		Проба масла №2. Соответствующее ему кислотное число = 0,0170		Проба масла №3. Соответствующее ему кислотное число = 0,1410		Проба масла №4. Соответствующее ему кислотное число = 0,1983		Проба масла №5. Соответствующее ему кислотное число = 0,3505	
нефилт рованное	филтрово ванное	нефилт рованное	филтрово ванное	нефилт рованное	филтрово ванное	нефилт рованное	филтрово ванное	нефилт рованное	филтрово ванное

Рис. 4. При облучении белым светом

### **Выводы**

Из всего выше изложенного следует, что при освещении трансформаторных масел с различной степенью старения красным светом можно определить наличие в них крупных коллоидных частиц размером  $\approx 650$  нм. При освещении зеленым светом – мелкие коллоидные частицы размером  $\approx 530$  нм и наличие ароматических соединений. А при воздействии белым светом определить наличие и коллоидных частиц разного размера, и ароматических соединений.

Увеличение интенсивности люминесценции при заданных параметрах может свидетельствовать о количественном содержании люминесцирующих веществ, т.е. их концентрации в образце масла.

Таким образом, нами предложен простой, наглядный качественный метод анализа диагностики трансформаторных масел, который не требует дорогостоящего оборудования и на начальном этапе позволяет определить степень старения масла.

### **Литература**

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Kindersberger J. Materials and Emerging Test Techniques // ELECTRA. 2012. №265. P. 16–20.
3. 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, Iss.1. P.346–355.
4. Гарифуллин М.Ш. Диагностика состояния бумажной изоляции по ИК спектрам отражения и спектрам люминесценции // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №5-6. С. 57–65.
5. Способ контроля технического состояния высоковольтного маслonaполненного электроэнергетического оборудования // Пат. 2461812 РФ, МПК G01N 21/27. / Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Заявл. 26.04.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26.
6. Объем и нормы испытания электрооборудования [Текст]: СТО 34.01-23.1-001-2017. – Введ. 2017 – 05 – 29. М.: ПАО «Россети», 2017. – 262 с.
7. Menkiti, M.C. Chemically improved Terminalia catappa L. oil: A possible renewable substitute for conventional mineral transformer oil [Text] / M.C. Menkiti, C.M. Agu, P.M. Ejikeme, O.E. Onyelucheya // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 5. – Is.1. – P. 1107 – 1118. – (DOI: doi.org / 10.1016 / j.jecce.2017.01.037).
8. Коробейников С.М. Исследование технологических операций, влияющих на определение концентрации присадки тонол в изоляционном масле высоковольтного оборудования [Текст] / С.М. Коробейников, М.Н. Лютикова // Проблемы региональной энергетики. – 2018. – №36 – С.96 – 105.
9. Козлов В.К. Исследование зависимости коэффициента пропускания и цвета изоляционных масел от их кислотного числа / В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, М.Ш. Гарифуллин // Материалы докл. IV Междунар. Молодежной школы-семинар БИКАМП'03. СПб., 2003. С. 309–313.
10. Гарифуллин М.Ш. Оценка диагностической ценности показателей качества изоляционного масла для систем мониторинга состояния трансформаторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №5-6. С. 131–134.
11. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Методы оптической спектроскопии в диагностике состоянии изоляции маслonaполненного электрооборудования / В.К. Козлов, М.Ш. Гарифуллин. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 192 с.
12. Туранова О.А., Вандюков А.Е., Козлов В.К., Туранов А.Н. Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. С. 628–631.

### **Авторы публикации**

**Валиуллина Дилия Мансуровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы

и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Ильцова Юлия Камилевна** – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Козлов Владимир Константинович** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### References

1. Lipshtein RA, Shakhnovich MI Transformer oil. Moscow: Energoatomizdat, 1983 296 p.
2. Kindersberger J. Materials and Emerging Test Techniques // ELECTRA. 2012. № 265. P. 16–20.
3. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of the aging degradation of the insulating elements in the oil-immersed transformer and its diagnostic method based on the field of measurement data // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, Iss.1. P.346–355.
4. Garifullin M.Sh. Diagnostics of the state of paper insulation by IR spectra of reflection and luminescence speckle // Izvestiya vuzov. Problems of energy. 2013. № 5-6. P. 57–65.
5. A method for monitoring the technical condition of high-voltage oil-filled electric power equipment // Pat. 2461812 RU, IPC G01N 21/27. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Published 20.09.2012. Bul. No. 26.
6. The scope and standards of electrical equipment testing [Text]: STR 34.01-23.1-001-2017. - Enter 2017 - 05 - 29. - М.: PJSC ROSSETI, 2017. - 262 p
7. Menkiti, M.C. Chemically improved Terminalia catappa L. oil: A possible renewable substitute for conventional mineral transformer oil [Text] / M.C. Menkiti, C.M. Agu, P.M. Ejikeme, O.E. Onyelucheya // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 5. – Is.1. – P. 1107 – 1118. – (DOI: doi.org / 10.1016 / j.jecce.2017.01.037).
8. Korobeynikov S.M. Research of technological operations affecting the determination of the concentration of the additive in the insulating oil of high-voltage equipment tononol [Text] / S.M. Korobeynikov, M.N. Lyutikova // Problems of regional energy. - 2018. - №36 - P.96 - 105.
9. Kozlov V.K. Investigation of the dependence of transmittance and color of insulating oils on their acid number / V.K. Kozlov, D.M. Valiullina, M.Sh. Garifullin // Materials dokl. IV Intern. youth school-seminar BIKAMP'03. St. Petersburg, 2003. P. 309–313.
10. Garifullin M.Sh. Evaluation of the diagnostic value of insulating oil quality indicators for transformer condition monitoring systems. // Proceedings of universities. Problems of energy. 2013. № 5-6. P. 131–134.
11. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Methods of optical spectroscopy in diagnosing the state of isolation of oil-filled electrical equipment / V.K. Kozlov, M.Sh. Garifullin. Kazan: Kazan. state. power. Univ., 2013. 192 p.
12. Turanova O.A., Vandyukov A.E., Kozlov VK, Turanov AN Optics and spectroscopy. 2013. P. 114. P. 628–631.

#### Authors of the publication

**Dilija M. Valiullina** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Julia K. Ilyasova** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Vladimir K. Kozlov** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.