

УДК: 621.314.212; 621.315.615.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И МАРКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ИХ ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ

М.Ш. Гарифуллин¹, Р.А. Гиниатуллин², В.К. Козлов¹, Р.Л. Резатдинов¹, Г.И. Ризванова¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

Резюме: Проведен анализ оптических спектров пропускания минеральных трансформаторных масел в диапазоне 300–1000 нм. Показано влияние на спектр пропускания трансформаторных масел технологии их производства, а также используемого при производстве нефтяного сырья. Разработан алгоритм определения марки трансформаторного масла по его спектру пропускания.

Ключевые слова: минеральное трансформаторное масло, оптическая спектроскопия, марка масла, технология производства масла.

DETERMINATION OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE AND MARK OF MINERAL TRANSFORMER OILS BY THEIR OPTICAL SPECTRA

M.Sh. Garifullin¹, R.A. Giniatullin², V.K. Kozlov¹, R.L. Rezatdinov¹, G.I. Rizvanova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract: Conducted analysis of optical transmission spectra mineral transformer oils in the range of 300 - 1000 nm. Showing influence at optical transmission spectrum of transformer oils technologies of their production, as well as used in the production of petroleum raw materials. The algorithm is developed determination of the oil grade according to its transmission spectrum.

Keywords: transformer oil, optical spectroscopy, oil grade, manufacturing technology of mineral oil.

Введение

В современных условиях основным видом жидкой изоляции маслonaполненных силовых трансформаторов является минеральное трансформаторное масло, изготавливаемое из соответствующей нефтяной фракции [1]. При этом используется различная технология производства, а также нефтяное сырье различного происхождения.

Для различного типа, а также класса напряжения маслonaполненного электрооборудования используются масла различных марок. При этом на практике встречаются ситуации, когда неизвестно какой тип масла использован в том или ином оборудовании, либо неизвестно происхождение и качество масла от поставщика. Например, масло марки ТКп было снято с производства Ярославским НПЗ в 2010 году, однако, в связи имеющимся спросом, было возобновлено производство этого масла по ТЦ ТУ 0253-002-72868394-2013 [2]. При этом стандартными методами, согласно РД 34.45-51.300-97, потребители не в силах оценить соответствие этого масла выпускавшемуся ранее.

В данной работе изложена методика экспресс-анализа оптических спектров пропускания трансформаторных масел на примере марок ГК, ВГ, *Nytro*, Т-1500 и ТКп, позволяющая определять технологию производства масел, а также идентифицировать их марку. Изложенные принципы могут быть использованы для анализа оптических спектров любых видов минеральных масел.

Методика исследования

Для получения спектров пропускания использовался спектрофотометр СФ-56. Длина оптического пути (толщина кюветы) составляла 50 мм, ширина щели 1 нм. Спектры пропускания записывались со спектральным разрешением 1 нм.

Основные результаты

На рис. 1 показаны нормированные спектры пропускания масел марок ГК, ВГ, *Nytro*, Т-1500 и ТКп. Подробный анализ влияния химического состава трансформаторных масел на их оптические спектры пропускания в диапазоне 300–1000 нм дан в работе [2]. В частности, было показано, что положение коротковолновой границы спектров пропускания $\tau(\lambda)$ зависит от концентрации в масле полиароматических соединений.

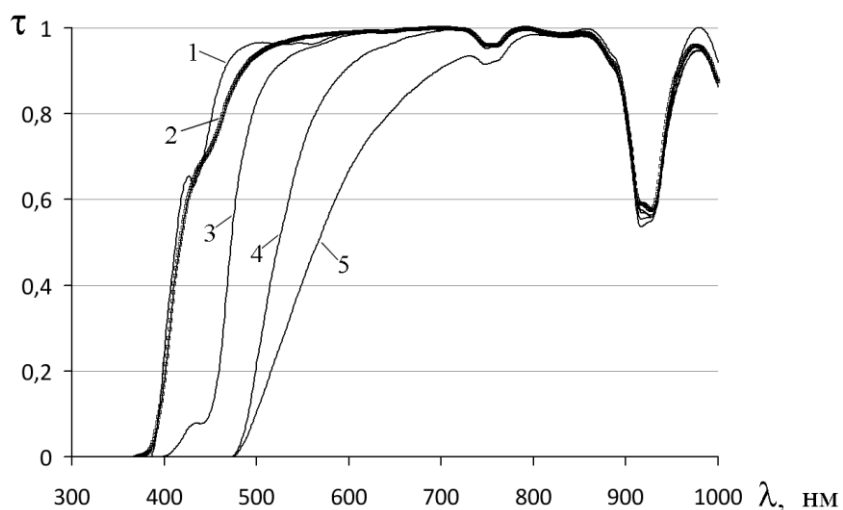


Рис. 1. Нормированные спектры пропускания $\tau(\lambda)$ различных масел
Марки масел: 1 – *Nytro*; 2 – ВГ; 3 – ГК; 4 – Т-1500; 5 – ТКп

У трансформаторных масел ГК, ВГ и *Nytro* при толщине слоя масла 50 мм коротковолновая граница спектра пропускания начинается с длин волн 370–400 нм. Указанные масла производятся по современной технологии гидрокрекинга, что обуславливает низкое содержание полиароматических, а также смолисто-асфальтеновых веществ. Граница спектров пропускания масел, производимых по другим технологиям, смещена относительно спектров рассматриваемой группы.

Первичная идентификация конкретной марки из этих трех масел основывается на анализе положения и интенсивности полос поглощения сложных ароматических молекул, присутствующих в составе масел. Так, для масла ГК характерно наличие в спектре пропускания характерного провала в районе 435 нм, который был отнесен нами к полосе поглощения перилена, содержащегося в масле ГК, производимого из Западно-сибирских нефтей. Кроме того, в рассматриваемой группе у ГК граница пропускания больше остальных сдвинута в длинноволновую область, располагаясь около 400 нм. У масел ВГ и *Nytro* спектр пропускания начинается с 370 нм. Кривые $\tau(\lambda)$ у ВГ и *Nytro* в коротковолновой области имеют свои характерные особенности, обусловленные различием состава ароматической фракции,

что позволяет идентифицировать эти масла. Однако, как будет показано далее, для этой цели удобнее проводить анализ полос поглощения в районе 900–950 нм.

Еще одна технология, широко используемая для производства трансформаторных масел, заключается в селективной очистке масляного дистиллята различными растворителями. По этой технологии производится трансформаторное масло марки Т-1500 (Т-1500У). При этом степень извлечения из дистиллята смолисто-асфальтеновых и полиароматических соединений хуже, нежели при гидрокрекинге, что приводит к снижению коэффициента пропускания в коротковолновой области спектра. В результате этого, по сравнению с маслами предыдущей группы, граница спектра пропускания масла Т-1500 смещается в длинноволновую область (образец № 4 на рис. 1).

Еще более высоким содержанием полиароматических и смолисто-асфальтеновых веществ характеризуются минеральные масла, производимые с помощью технологии кислотно-щелочной очистки. Представителем данной технологии является трансформаторное масло ТКп. Граница спектра пропускания масла ТКп также сдвинута в длинноволновую область (образец № 5 на рис. 1). Характерным отличием от спектра масла марки Т-1500 является более пологий наклон кривой спектра пропускания $\tau(\lambda)$ в диапазоне 500–800 нм. Данная особенность обусловлена рассеянием излучения на дисперсной фазе (коллоидных частицах), которую в свежем масле формируют ассоциаты из асфальтеновых молекул [3]. По мере роста в масле окисленных соединений роль фактора рассеяния будет еще более выраженной [4; 5].

Таким образом, на основе анализа коротковолновой границы спектра пропускания трансформаторного масла можно определить использованную для его производства технологию – гидрокрекинг, селективная очистка или кислотно-щелочная очистка. Это сразу позволяет идентифицировать такие масла, как Т-1500 и ТКп. Из числа масел, производимых по технологии гидрокрекинга, как было показано, наиболее просто идентифицируется масло марки ГК.

Рассмотрим далее спектральный диапазон 900–950 нм, в котором проявляются ключевые отличия спектров пропускания масел ГК, ВГ и обусловленные отличием в их углеводородной основе. В рассматриваемой области спектра расположены полосы поглощения С-Н колебаний в метильных CH_3 -группах (913 нм), метиленовых CH_2 -группах нафтеновых молекул (924 нм), а также метиленовых CH_2 -группах парафиновых цепочек (932 нм). На рис. 2 показаны кривые $\tau(\lambda)$ масел ГК, ВГ и *Nytro* в спектральном диапазоне 850–1000 нм. Указанные полосы поглощения в данной области спектра перекрываются между собой, образуя интегральную полосу поглощения, имеющую явно выраженные два плеча. В зависимости от соотношения в масле нафтеновых и парафиновых соединений одно из плеч может быть более интенсивным. На рисунке они условно обозначены как «Нафтены» (~920 нм) и «Парафины» (~930 нм).

Дадим интерпретацию представленных спектров пропускания. Масло *Nytro* производится из Венесуэльских нафтеновых нефтей [6], обуславливающих высокое содержание в этом масле нафтеновых молекул, что приводит к снижению коэффициента пропускания в районе 915–925 нм (пик «Нафтены»). Пик «Парафины» в масле *Nytro* имеет меньшую относительную интенсивность.

Масло ГК производится из западно-сибирских парафинистых нефтей, поэтому в спектре пропускания этого масла более интенсивной является полоса поглощения, относящаяся к парафиновым молекулам (пик «Парафины»).

По соотношению интенсивностей пиков «Нафтены» и «Парафины» масло ВГ занимает промежуточное положение между *Nytro* и ГК. Используя принцип относительной интенсивности пиков нафтеновых и парафиновых углеводородов, можно идентифицировать конкретную марку масла. Данная методика может быть использована и для других трансформаторных масел, не рассмотренных в данной статье.

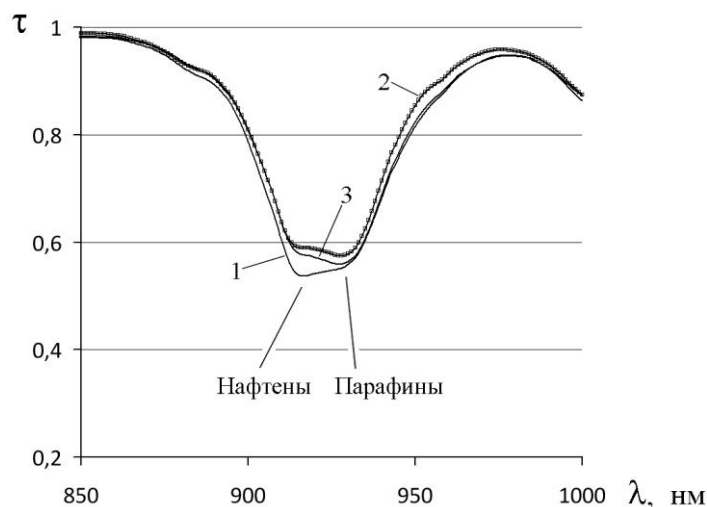


Рис. 2. Влияние структурно-группового состава масел на их спектры пропускания
Марки масел: 1 – Nytro; 2 – ВГ; 3 – ГК

Следует отметить, что для разделения и последующего анализа перекрывающихся полос поглощения в области 900–950 нм можно использовать математическую процедуру двукратного дифференцирования кривой $\tau(\lambda)$ либо кривой оптической плотности $D(\lambda)$ [7; 8].

Таким образом, на примере 5 марок трансформаторных масел продемонстрирована возможность определения технологии производства, а также марки масел на основе анализа их оптических спектров пропускания в диапазоне 300–1000 нм. По сравнению с лабораторной методикой идентификации масел путем исследования их спектров в ИК диапазоне, согласно ASTM D 2144 [9] предлагаемые оптические исследования могут проводиться в виде экспресс-анализа с помощью малогабаритных спектрометров с ПЗС фотоприемниками [10].

Выводы

Анализ спектра пропускания минерального трансформаторного масла в диапазоне 300–1000 нм позволяет оценить содержание в масле полиароматических и смолисто-асфальтеновых веществ, а также соотношение нафтеновых и парафиновых углеводородов в масле.

Основываясь на данных спектрального анализа можно определить технологию производства, а также марку трансформаторного масла.

Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Особенности оптических характеристик трансформаторных масел различных марок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 11–19.
3. Mullins O.C. The Modified Yen Model. Energy & Fuels. 2010, 24 (4). P. 2179–2207
4. Шкалик А.В., Юшкова Е.А., Гафиятуллин Л.Г., Осин Ю.Н., Туранова О.А., Козлов В.К., Туранов А.Н. О рассеянии света в трансформаторном масле // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110, № 5. С. 768–772.
5. Гарифуллин М.Ш. Использование методов оптической спектроскопии для диагностики минеральных изоляционных масел // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 3299–3304.
6. Липштейн Р.А., Глазунова Т.В., Довгопольный Е.Е. Шведские трансформаторные масла фирмы “Nynas” марок Nitro 11GX и Nytro 10X // Электрические станции. 1998. № 1. С. 61–64.
7. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Определение концентрации ионола и кислотного числа в трансформаторных маслах спектральным методом // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 5–6. С. 85–96.

8. Гарифуллин М.Ш. Диагностические исследования изоляционных масел различными методами оптической спектроскопии // Энергетика Татарстана. 2013. № 1. С. 53–59.

9. ASTM D 2144. Standard Test Methods for Examination of Electrical Insulating Oils by Infrared Absorption.

10. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Прибор для спектральных исследований изоляционных масел в диапазоне 600–1100 нм. // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 9–10. С. 114–116.

Авторы публикации

Гарифуллин Марсель Шарифьянович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гиниатуллин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и электротехника» (ЭЭ) Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

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

Резатдинов Равиль Ленарович – магистрант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ризванова Гульназ Ильдусовна – магистрант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. Transformer oil. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 p.
2. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Features of optical characteristics of transformer oils of various grades. Proceedings of the higher educational institutions // ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2015. No. 11–12. P. 11–19.
3. Mullins O.C. The Modified Yen Model. Energy & Fuels. 2010, 24 (4). P. 2179–2207.
4. Shkalikov A.V., Gafiyatullin L.G., Osin Yu.N., Turanova O.A., Turanov A.N., Yushkova E.A., Kozlov V.K. On light scattering in transformer oil // Optics and Spectroscopy. 2011. Vol. 110, No. 5. P. 768–772.
5. Garifullin M.S. Use of methods optical spectroscopy for diagnosis of mineral insulating oils // Fundamental Research. 2013. No. 10. P. 3299–3304.
6. Lipshteyn R.A., Glazunov T.V., Dovgopolyi E.E. Swedish transformer oils company «Nynas» brands Nitro 11GX and Nytro 10X // Electric stations. 1998. No. 1. P. 61–64.
7. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Determination of the concentration of ionol and acid number in transformer oils by the spectral method. Proceedings of the higher educational institutions // ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2001. No. 5–6. P. 85–96.
8. Garifullin M.S. Diagnostic studies of insulating oils by various methods of optical spectroscopy // Power engineering of Tatarstan. 2013. No. 1. P. 53–59.
9. ASTM D 2144. Standard Test Methods for Examination of Electrical Insulating Oils by Infrared Absorption.
10. Kozlov VK, Garifullin M.Sh. Instrument for spectral studies of insulating oils in the range 600-1100 nm. // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2001. No. 9–10. P. 114–116.

Authors of the publication

Marsel Sh. Garifullin – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Ruslan A. Gianiatullin – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of “Electric Drive and Electrical Engineering”, Kazan National Research Technological University.

Vladimir K. Kozlov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Ravil L. Rezatdinov – Student of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Gulnaz I. Rizyanova – Student of the department “Electric power systems and networks”, Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

13 июля 2017 г.