

Научная статья

УДК629.017

DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

Анализ судовых моторных масел с помощью релаксации диэлектрической проницаемости

Оксана Владимировна Сынашенко¹, Николай Яковлевич Синявский², Наталья Анатольевна Кострикова³

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация. В процессе эксплуатации судового моторного масла происходит его старение, основными факторами которого являются окислительная высокотемпературная деградация и загрязнение сажей, металлами износа, топливом, водой и охлаждающей жидкостью. В работе методом релаксационной диэлектрической спектроскопии исследован ряд отработанных судовых масел для определения их характеристик, связанных с деградацией смазочного материала и износом двигателя. Для судовых масел Total Disola M4015, Shell Rimula, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Navigo TPEO 12/40 экспериментально получены зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от частоты. Диэлектрическая проницаемость судовых моторных масел находится в пределах от 2,1 до 2,4 и зависит от вязкости, плотности масла, содержания в нем парафиновых, нафтеновых и ароматических соединений и пакета присадок. Увеличение содержания присадок повышает диэлектрическую проницаемость масла. Авторами исследована связь времен дипольной релаксации свежих и отработанных масел с кинематической вязкостью, с содержанием присадок и продуктов износа. Искомый массив распределения времен релаксации рассчитывался посредством регуляризации и метода наименьших квадратов с помощью алгоритма CONTIN. Вычисления проводились в программе RILT, работающей в среде MatLab. Показано, что поляризация и последующая дипольная релаксация вызываются молекулами присадок, которые срабатывают в процессе эксплуатации двигателя. Различия во временах релаксации могут быть вызваны также образованием ассоциаций, включающих дипольные молекулы. Данные, полученные в работе, могут быть использованы в дальнейшем для построения экспертной системы диагностики двигателя и определения параметров неизвестных масел.

Ключевые слова: моторные масла, дипольная поляризация, диэлектрическая проницаемость, релаксация.

Для цитирования: Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Анализ судовых моторных масел с помощью релаксации диэлектрической проницаемости // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 131-144. DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

Original article

Analysis of marine motor oils using dielectric permittivity relaxation

Oksana V. Synashenko¹, Nikolay Ya. Sinyavskiy², Natal'ya A. Kostrikova³

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Abstract. During exploitation of marine engine oil, its aging occurs, the main factors of which are oxidative high-temperature degradation and contamination with soot, wear metals, fuel, water and coolant. In this work, a number of used marine oils have been studied by relaxation dielectric spectroscopy to determine their characteristics associated with lubricant degradation and engine wear. For marine oils Total DISOLA M4015, Shell Rimula, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Navigo TPEO 12/40, the dependences of the relative permittivity and the tangent of the loss angle on frequency have been experimentally obtained. The dielectric constant of marine motor oils ranges from 2.1 to 2.4 and depends on the viscosity, density of the oil, the content of paraffin, naphthenic and aromatic compounds in it and the additive package. An increase in the additive content increases the dielectric constant of the oil. The authors investigated the relationship of the dipole relaxation times of fresh and used oils with kinematic viscosity, with the content of additives and wear products. The desired array of relaxation time distributions has been calculated by regularization and the least squares method using the CONTIN algorithm. The calculations have been carried out in the RILT program running in the MatLab environment. It has been shown that polarization and subsequent dipole relaxation are caused by additive molecules that are triggered during engine operation. Differences in relaxation times can also be caused by the formation of associations involving dipole molecules. The data obtained in the work can be used in the future to build an expert engine diagnostics system and to determine the parameters of unknown oils.

Keywords: motor oils, dipole polarization, permittivity, relaxation.

For citation: Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Analysis of marine motor oils using dielectric permittivity relaxation // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023;(71):131-144. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-71-131-144

ВВЕДЕНИЕ

Моторное масло играет ключевую роль в судовых дизельных двигателях. Оно состоит из сложной смеси углеводородов и представляет собой комбинацию базового масла и набора присадок [1]. Смазочные масла в двигателях используются для уменьшения трения подвижных узлов и поддержания их чистоты,

поскольку содержат как моющие, так и диспергирующие присадки. Старение моторного масла представляет собой сложный процесс, в ходе которого происходит деградация базового масла и истощение его присадок. Основными факторами старения являются окислительная высокотемпературная деградация и загрязнение сажей, металлами износа, топливом, водой и охлаждающей жидкостью.

Существует множество физических и химических методов исследования характеристик моторного масла: спектрофотометрия, флуоресцентная спектроскопия, ИК-спектроскопия, феррография и многие другие. В статье [2] для обнаружения в моторном масле ферромагнитных частиц и определения их дисперсности применяют магнитооптический метод в совокупности с методом фотонной корреляционной спектроскопии. Это дает возможность регистрации малого содержания ферромагнитных частиц износа в масле и их дисперсности.

В работе [3] проведено исследование свежего и отработанного судового моторного масла методом высокого разрешения ^1H ЯМР и с помощью релаксометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с инверсией преобразования Лапласа. Зарегистрировано изменение молярного содержания функциональных групп CH , CH_2 и CH_3 для отработанных масел. Показано, что времена спин-спиновой релаксации протонов отработанного масла 10W40 смещаются в сторону меньших значений, а для отработанного масла М-4015 увеличиваются. Это свидетельствует об изменении подвижности функциональных групп макромолекул, вызванном изменением вязкости отработанного масла.

В статье [4] для регистрации продуктов износа применялись методы фотометрии и флуоресценции. Предложен способ определения концентрации ферромагнитных частиц посредством анализа спектров оптической плотности в зависимости от длины волны при помещении образца в постоянное магнитное поле.

В последнее время большое внимание уделяется диэлектрическим свойствам промышленных смазок [5]. Методы анализа диэлектрической проницаемости относительно быстрые, простые и недорогие. Диэлектрическая спектроскопия [6] — это аналитический метод исследования взаимодействия между диэлектрическим материалом и электромагнитной энергией в радиочастотном диапазоне. В работе [7] диэлектрическая спектроскопия использовалась для анализа процесса окисления смазочного масла двигателя в сравнении с Фурье ИК-спектроскопией.

В публикации [8] проводится сравнение минерального и углеводородного масел по проводимости и механизмам релаксации в комплексной плоскости диаграммы Коула-Коула и по диэлектрическим потерям. Здесь использован метод диэлектрической релаксационной спектроскопии в частотной области при различных значениях напряженности переменного электрического поля.

В статье [9] изучались диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери и изоляционные характеристики бумаги, пропитанной маслом с наночастицами оксида железа. Исследования показали, что наночастицы связаны с пропитанными бумажными волокнами О–Н связями и что относительная диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери бумаги, пропитанной наножидкостью, увеличиваются. При этом электрическая прочность на пробой пропитанной наножидкостью бумаги может увеличиваться.

В публикации [10] представлена процедура подбора и компьютерный код для численной оценки диэлектрических свойств посредством функции распределения времен релаксации. Подход основан на линейном методе наименьших

квадратов. Базисный набор спектров здесь рассчитывается с использованием релаксационной модели Дебая. Метод протестирован на смоделированных спектрах с определенными параметрами диэлектрической релаксации и на некоторых экспериментальных диэлектрических спектрах.

В работе [11] приводятся результаты измерений диэлектрической проницаемости в диапазоне от микроволновых до инфракрасных частот для различных жидких электролитов и неэлектролитных систем. Продемонстрировано три вида релаксационных процессов с практически непрерывным распределением времени релаксации, включая очень короткое (около 1 пс).

Диэлектрические свойства асфальтенов, осажденных из четырех различных сортов нефти, были изучены в работе [12] в частотном диапазоне 0,01–1000 Гц с помощью спектроскопии в низкочастотной области. Показано, что увеличение агрегации асфальтенов приводит к значительному уменьшению аномального эффекта диэлектрической проницаемости на низких частотах.

В статье [13] с помощью диэлектрической спектроскопии проанализирована корреляция между степенью окисления моторного масла и его диэлектрическими характеристиками. В [14] измерены частотные характеристики трех разных видов минерального масла и выполнено сравнение с результатами моделирования по предлагаемой авторами поляризационной модели.

Исследования по анализу моторных масел, проведенные в [15], подтверждают селективность и чувствительность спектроскопии диэлектрической проницаемости, основанной на измерениях частотной зависимости действительной составляющей комплексной емкости.

Важной проблемой при эксплуатации моторных масел является деградация его компонентов, функциональных присадок, так как эксплуатационные характеристики масла зависят от концентрации активных веществ присадок.

Цель настоящей работы – исследование ряда отработанных и свежих моторных масел методом диэлектрической спектроскопии в широком частотном диапазоне, изучение распределения времен дипольной диэлектрической релаксации, обнаружение функциональных присадок, определяющих качество смазочных масел различных видов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментальных исследований применялся современный прецизионный цифровой измеритель LCR параметров TH2827C [16]. Диапазон рабочих частот прибора – 0,02–1000 кГц. Измерительной ячейкой служил воздушный конденсатор, помещаемый в исследуемое масло. Все измерения выполнены при температуре $T = 295$ °К. Измеренные частотные зависимости диэлектрических параметров обрабатывались на компьютере.

Свежие и отработанные моторные масла являются полярными диэлектриками. Во внешнем переменном электрическом поле поляризация образца уменьшается, если время установления равновесной ориентации диполей становится больше периода колебаний электрического поля. В случае простых жидкостей поляризация спадает с одним характерным временем релаксации, и здесь уравнение Дебая для комплексной относительной диэлектрической проницаемости имеет вид [17]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega T_r}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; ε_∞ – относительная диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow \infty$; ε_s – диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow 0$; T_r – время диэлектрической релаксации. Тангенс угла диэлектрических потерь для модели Дебая можно записать следующим образом:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega T_r}{\varepsilon + \varepsilon_\infty \omega^2 T_r^2}. \quad (2)$$

Моторное масло является сложной композицией полярных молекул и характеризуется не одним, а несколькими временами дипольной релаксации, которые относятся к разным группам молекул. Если функцию распределения диэлектрических времен релаксации обозначить как $G(T_r)$, то действительную часть диэлектрической проницаемости можно записать:

$$\varepsilon' = \int_0^\infty G(T_r) \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 T_r^2}{1 + \omega^2 T_r^2} dT_r. \quad (3)$$

Функция (3) описывает экспериментальную частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости моторного масла. Функция $G(T_r)$ распределения времен диэлектрической релаксации позволит получать информацию о составе присадок в масле, частицах износа, загрязняющих примесях и химической деградации масла.

Процедуру нахождения распределения дипольных времен релаксации иллюстрирует рис. 1. Для получения спектра времен релаксации $G(T_r)$ нужно к применить инверсию интегрального преобразования (ИТ) к выражению (3). Для инверсии в работе применяется алгоритм [18] и программа RILT [19], работающая в среде MatLab. Искомый массив $G(T_r)$ рассчитывается с помощью регуляризации методом наименьших квадратов по алгоритму CONTIN [18].

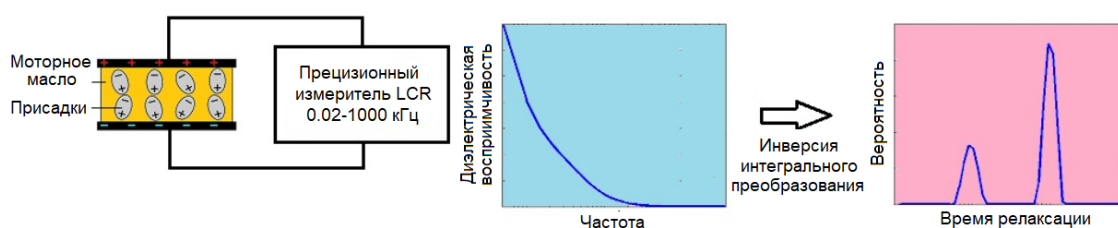


Рис. 1. Схема нахождения распределения времен релаксации
Fig. 1. Scheme for obtaining the relaxation times distribution

Для контроля вязкости моторных масел применялся капиллярный вискозиметр обратного тока ВНЖ 1.41 ЭКРОС с диаметром капилляра $d = 1,41$ мм. Измерения вязкости свежих и отработанных моторных масел проводились при комнатной температуре ($t = 23$ °C), полученные данные приведены в таблице, где также представлены значения вязкости для исследуемых масел при температурах 40 °C и 100 °C, заданные производителями [20–26].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диэлектрическая проницаемость дает информацию о наличии загрязнений и состоянии пакета присадок к маслу. При измерении диэлектрической проницаемости отработанного смазочного масла изменения его диэлектрической проницаемости могут указывать на присутствие загрязняющих веществ, таких как вода, топливо или частицы износа, на окисление масла или истощение присадок. Любое увеличение диэлектрической проницаемости указывает на наличие какого-либо загрязнения или изменение химического состава масла. В работе [27] на модельных образцах были получены зависимости диэлектрической проницаемости от количества частиц износа алюминия и железа в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 0.0031 \cdot X_{Al} + 2.4049, \\ \varepsilon &= 0.0004 \cdot X_{Fe} + 2.4036,\end{aligned}\tag{4}$$

где X_{Al} – концентрация алюминия в ppm; X_{Fe} – концентрация железа в ppm. С повышением температуры плотность масла уменьшается, следовательно, и диэлектрическая проницаемость масла тоже уменьшается.

Моторные масла представляют собой сложные композиции углеводородов. Их относительная диэлектрическая проницаемость лежит в пределах от 2,1 до 2,4 и зависит от вязкости, плотности масла, содержания в нем парафиновых, нафтеновых и ароматических соединений и пакета присадок. Наличие присадок повышает диэлектрическую проницаемость масла, т. к. сами присадки имеют более высокую диэлектрическую проницаемость. Диэлектрические характеристики моторных масел коррелируют с вязкостными характеристиками [17].

Основные диэлектрические характеристики при температуре $T = 295$ °К в начале и конце частотного диапазона LCR TH2827C для исследованных масел приведены в публикации [28]. Можно обнаружить корреляцию между этими характеристиками и кинематическими вязкостями (таблица).

Таблица. Измеренные значения вязкости свежих и отработанных моторных масел
Table. Measured viscosity values of fresh and used motor oils

№ п/п	Наименование масла	Кинематическая вязкость ν , мм ² /с		
		$t = 23$ °C	$t = 40$ °C	$t = 100$ °C
1	Shell Rimula 15W40			
	свежее	285,9	109,0 [20]	14,7 [20]
	отработанное 250 ч	109,2	–	–
	отработанное 500 ч	253,3	–	–
2	Mobil 5W30			
	свежее	157,1	60,7 [21]	10,3 [21]
	отработанное 170 ч	176,3	–	–
3	Mobil 5W40			
	свежее	171,8	79,0 [22]	13,2 [22]
	отработанное 160 ч	140,2	–	–

4	Mobil 10W40			
	свежее	318,8	89,3 [23]	13,3 [23]
	отработанное 300 ч	270,2	–	–
5	Total Disola M 4015			
	Свежее	420,8	145,0 [24]	14,2 [24]
	отработанное 300 ч	311,9	–	–
6	Navigo TPEO 12/40			
	свежее	360,8	–	14,5 [25]
	отработанное 300 ч	626,2	–	–
7	Масло базовое SN-150	75,3	30,0–31,5 [26]	5,0–5,5 [26]
8	Масло базовое SN-500	264,4	97,5–102,0[26]	10,5–11,5 [26]

Релаксация диэлектрической проницаемости свежих и отработанных масел вызвана устанавливающейся ориентацией полярных молекул присадок. Как следует из частотных зависимостей ε для базовых масел SN-150 и SN-500, у них дипольная поляризация в исследованном диапазоне частот практически отсутствует (рис. 2). Среди свежих масел при $f = 1$ МГц самая большая диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon = 2,2596$) у масла ТПЕО 12/40, а самая низкая ($\varepsilon = 2,1275$) – у масла Mobil 5W40. На частоте вплоть до $f = 1$ МГц для всех исследованных масел другие виды поляризации (ионная, электронная) не проявляются.

Зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для базовых масел SN-150 и SN-500, свежего и отработанного 300 часов моторного масла Total Disola показаны на рис. 2.

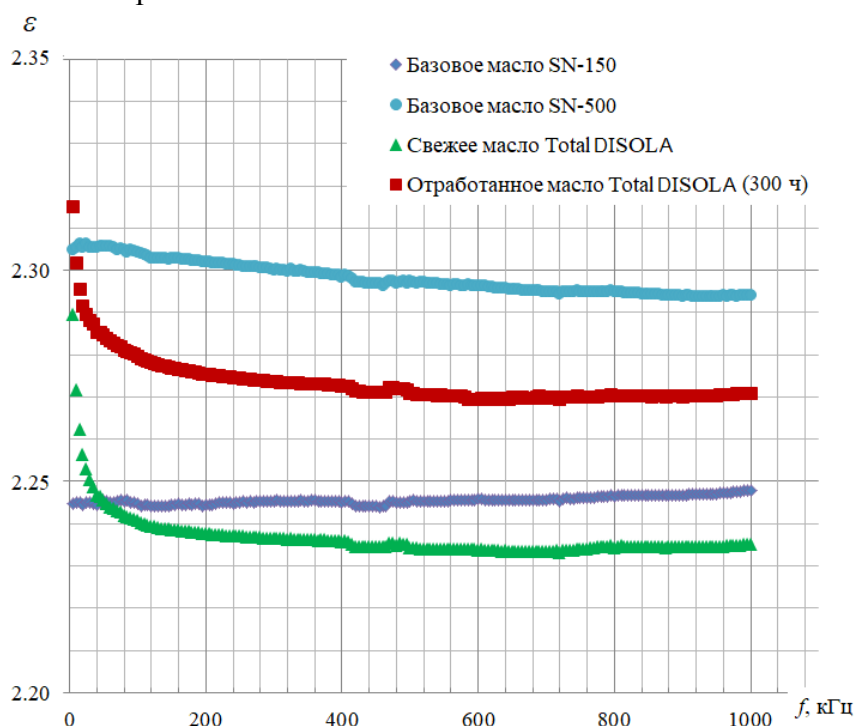


Рис. 2. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости от частоты
Fig. 2. Dependences of the dielectric permittivity on frequency

Как видно из графика, базовое масло, не содержащее пакета присадок, практически не имеет диполей, которые могли бы релаксировать. Диполи, вызывающие поляризацию и последующую релаксацию, – это молекулы присадок, которые в процессе работы двигателя срабатываются. Это же иллюстрируют и зависимости тангенса угла потерь для этих масел, показанные на рис. 3.

Моторные масла состоят из базового масла и системы присадок для улучшения эксплуатационных свойств масла. Распределение зарядов у молекул базовых масел является практически равномерным, и они не имеют дипольных моментов. В результате тангенс угла потерь и диэлектрическая проницаемость базовых масел SN-150 и SN-500 в исследованном диапазоне практически не зависят от частоты. Из эксперимента и литературных данных следует, что при отработке моторного масла в двигателе его диэлектрическая проницаемость увеличивается. Это связано с появлением в масле частиц износа металлов, с загрязнениями и окислением углеводородов.

Для получения необходимых свойств в масла добавляют металлосодержащие присадки, количество которых влияет на величину диэлектрической проницаемости и скорость ее релаксации.

Результаты инверсии интегрального преобразования (3) в виде функций распределения времен релаксации $G(T_r)$ приведены для свежих и отработанных масел на рис. 4. Распределения времен релаксации для свежих масел Total M4015 и Shell Rimula имеют сложный многомодальный характер (кривые 1а и 2а на рис. 4).

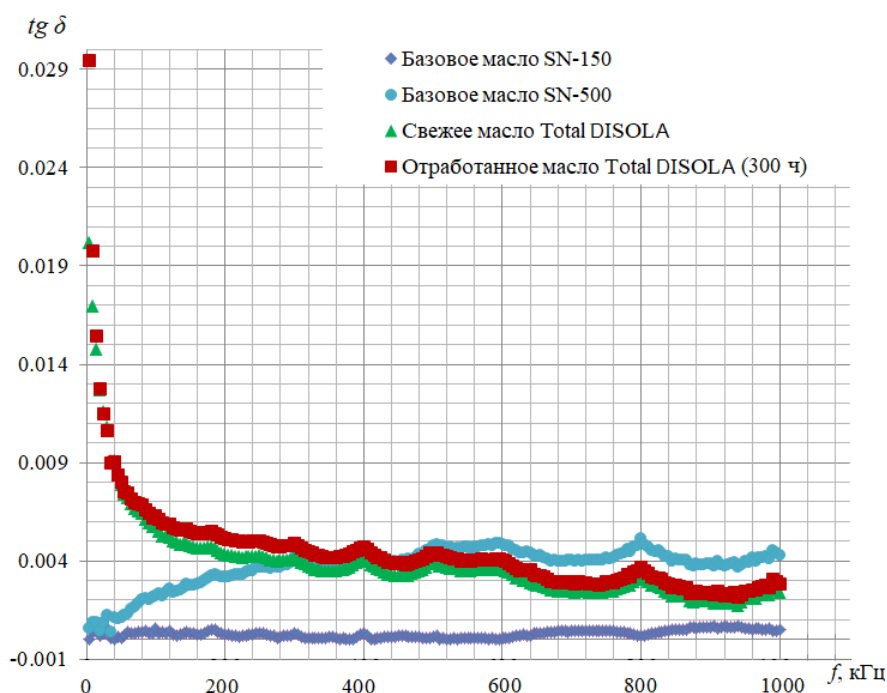


Рис. 3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты
Fig. 3. Dependence of the tangent of dielectric loss angle on frequency

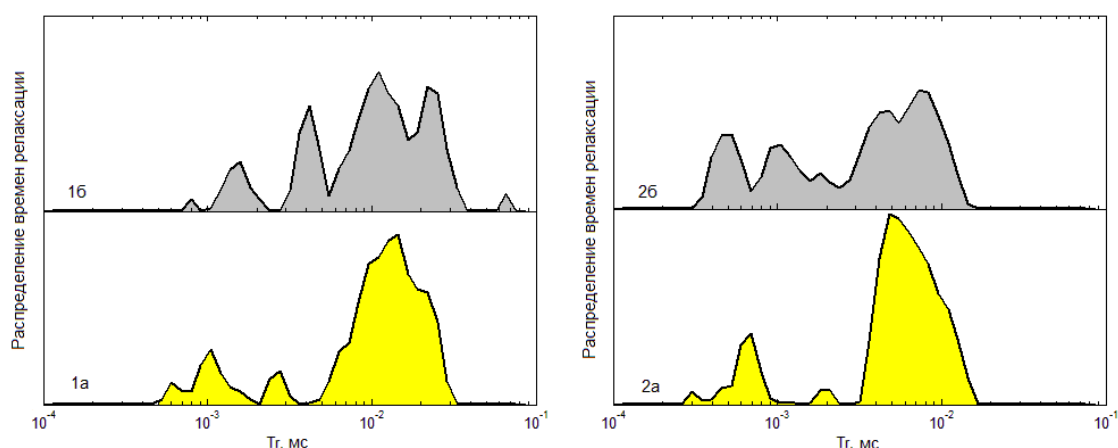


Рис. 4. Спектры времен релаксации диэлектрической проницаемости свежих и отработанных масел Shell Rimula (1a и 1б) и Total Disola M4015 (2a и 2б)

Fig. 4. Spectra of relaxation times of the dielectric constant of fresh and used oils Shell Rimula (1a and 1b) and Total Disola M4015 (2a and 2b)

У масла Shell Rimula максимальный пик в области 0,015 мс обусловлен, вероятно, диполями основной противоизносной, противозадирной и антиоксидантной присадки диалкилдитиофосфата цинка (ZDDP). Эта противоизносная присадка присутствует в настоящее время практически во всех моторных маслах. О количестве металлосодержащих присадок, в том числе цинка диалкилдитиофосфата, можно судить по величине сульфатной зольности – одному из главных параметров свежего масла. Значение ε и сульфатной золы некоторых масел приведены для сравнения в [29]. Наиболее интенсивный пик у масла Total M4015 находится в районе $5 \cdot 10^{-3}$ мс и обусловлен, скорее всего, другой присадкой. Положения пиков на спектрах $G(T_r)$ в отработанных маслах меняются незначительно по сравнению со свежими маслами. В отработанных маслах Total M4015 и Shell Rimula форма распределения времен релаксации меняется, что обусловлено продуктами термического разложения углеводородов. Значительное повышение содержания фосфора, цинка и бора [30] в отработанном масле Total M4015 вызвано, по-видимому, загрязнением отработанного масла топливом, содержащим противоизносные присадки.

Распределения времен диэлектрической релаксации для масел Mobil 5W30 и Mobil 5W40 получаются близкими друг к другу. Состав углеводородов этих масел одинаков, но масло Mobil 5W30 имеет более высокую степень очистки и меньшую вязкость по сравнению с маслом Mobil 5W40. В отработанном масле Mobil 5W30 много загрязняющей примеси калия [30], пик с коротким временем релаксации сдвигается в область коротких времен, очевидно, из-за уменьшения вязкости. Калий в отработанных маслах может появляться от присадок в топливо или от антифриза, содержащего присадки на основе калия.

Отличительной особенностью спектров времен релаксации для масел Mobil 15W40 и Rimula 15W40 является то, что основной пик почти на порядок больше, чем для других исследованных масел. В остальном вид спектров подобен друг другу. В масле Rimula 15W40, по данным [30], самое высокое содержа-

ние бора (290 ppm). Бор во многих моторных маслах содержится в диспергирующих присадках. Есть бор и в противоизносной присадке нитрита бора. В свежем масле Rimula 15W40 довольно значительное содержание молибдена [30], а он имеется в дитиокарбамате молибдена (MoDTC), противоизносной присадке, эффективном модификаторе трения. Пики времен релаксации для исследованных масел могут быть обусловлены вышеупомянутыми присадками. Малые значения времен релаксации связаны с диполями малых молекулярных групп, например, высокоподвижными хвостами макромолекул, большие значения времен релаксации вызваны движением больших молекул, как целых. Различия во временах релаксации могут быть вызваны также образованием ассоциаций, включающих дипольные молекулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе использован новый подход анализа зависимости диэлектрической проницаемости моторных масел от частоты для нахождения распределения времен дипольной релаксации. Искомый массив распределения времен релаксации рассчитывается с помощью регуляризации методом наименьших квадратов. Метод использует релаксационную модель Дебая, но может применяться и для других моделей. Процедура предварительно протестирована на смоделированных спектрах с известными параметрами диэлектрической релаксации и на реальных диэлектрических спектрах моторных масел, она оказалась надежной и достаточно устойчивой. Спектры диэлектрических времен релаксации являются предпосылкой для интерпретации процессов в моторных маслах на молекулярном уровне. Важная информация, недоступная с помощью других методов, может быть получена и использована для объяснения свойств растворов или смесей растворов.

Список источников

1. Моторные масла / Р. Балтенас [и др.]. М., СПб.: АльфаЛаб, 2000. 272 с.
2. Sinyavsky N. Ya., Ivanov A. M., Kostrikova N. A. Analysis of wear particles in used marine engine oils // Marine intellectual technologies. 2021. N 4 (4). P. 44–48.
3. Sinyavsky N., Mershiev I. NMR relaxometry used ship oils // Journal of Eta Maritime Science. 2022. V. 10 (3). P. 195–201.
4. Korneva I. P., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of marine motor oils with wear products by optical methods // Marine intellectual technologies. 2022. N 4 (3). P. 72–78.
5. Guan L., Feng X. L., Xiong G. Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data // Analytica Chimica Acta. 2008. V. 628. Is. 1. P. 117–120.
6. Kremer F., Schönhals A. (eds). Broadband Dielectric Spectroscopy. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg GmbH, 2012.
7. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring / L. Guan, X. L. Feng, G. Xiong, J. A. Xie // Sensors and Actuators A: Physical. 2011. V. 168. Is. 1. P. 22–29.

8. Dielectric Properties of Electrical Insulating Liquids for High Voltage Electric Devices in a Time-Varying Electric Field / Peter Havran [et al.] // *Energies*. 2022. N 15. P. 391.
9. The Effect of Fe₃O₄ Nanoparticle Size on Electrical Properties of Nanofluid Impregnated Paper and Trapping Analysis / Bin Du, Qian Liu, Yu Shi, Yushun Zhao // *Molecules*. 2020. N 25. P. 3566.
10. Zasetsky A. Y., Buchner R. Quasi-linear least squares and computer code for numerical evaluation of relaxation time distribution from broadband dielectric spectra // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011. N 23. P. 025903.
11. Barthel J., Buchner R. High frequency permittivity and its use in the investigation of solution properties // *Pure & App. Chem*. 1991. V. 63. N 10. P. 1473–1482.
12. Dielectric Properties of Crude Oil Components / H. Vralstadet [et al.] // *Energy Fuels*. 2009. N 23. P. 5596–5602.
13. Dielectric submicroscopic phase characterisation of engine oil dispersed in jet fuel based on on-line dielectric spectroscopy /Ying-zhong Gong [et al.] // *Lubrication Science*. 2017. V. 29. Is. 5. P. 335–354.
14. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement /Yuan Zhouet [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2014. N 115. P. 124105.
15. Levi D., Stoyanov Z., Vladikova D. Application of permittivity spectroscopy for screening of motor oils lubricating properties // *Bulgarian Chemical Communications*. 2017. V. 49. Sp. is. C. P. 254–259.
16. TH2826/A High Frequency LCR-Meter. Operationmanual. URL: http://222.185.248.92:8080/upload/UploadAction2/20200114135540_522.pdf (дата обращения: 01.04.2023).
17. Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: КГУ, 2008. 112 с.
18. Provencher S. W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations // *Computer Physics Communications*. 1982. V. 27 (3). P. 213–227.
19. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform, 2004. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> (дата обращения: 26.06.2022).
20. Моторное масло Shell вязкостью 15W-40 – характеристики. URL: https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40/ (дата обращения: 08.10.2023).
21. Mobil 1™x15W-30. URL: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-x1-5w-30> (дата обращения: 08.10.2023).
22. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-mda/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (дата обращения: 08.10.2023).
23. MOBIL™ 10W40. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-10w-40> (дата обращения: 08.10.2023).
24. Total Disola M 4015 – моторное масло для высоко- и среднеоборотных дизелей судов. URL: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (дата обращения: 08.10.2023).

25. Navigo TPEO 12/40. URL: <http://www.fareastfish.ru/oil/trunk/navigo-tpeo-12-40.html> (дата обращения: 08.10.2023).
26. Базовые масла. URL: <https://danalubes.ru/products/base-oils> (дата обращения: 08.10.2023).
27. Григоров А. Б., Наглюк И. С. Рациональное использование моторных масел: монография. Харьков: Точка, 2013. 178 с.
28. Ковалишин Ф. П. Исследование релаксации электрических параметров отработанного моторного масла // Вестник молодежной науки. 2023. № 2 (39). С. 1–7.
29. Григоров А. Б., Карножицкий П. В., Наглюк И. С. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации // Автомобильный транспорт. 2007. № 20. С. 3.
30. Sinyavsky N., Kostrikova N., Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics, 2023 (in print).

References

1. Baltenas R. [et al.]. *Motornye masla* [Motor oils]. Moscow, Saint-Petersburg, Al'faLab. 2000, 272 p.
2. Sinyavsky N. Ya., Ivanov A. M., Kostrikova N. A. Analysis of wear particles in used marine engine oils. *Marine intellectual technologies*. 2021, no. 4 (4), pp. 44–48.
3. Sinyavsky N., Mershev I. NMR relaxometry used ship oils. *Journal of Eta Maritime Science*. 2022, vol. 10 (3), pp. 195–201.
4. Korneva I. P., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of marine motor oils with wear products by optical methods. *Marine intellectual technologies*. 2022, no. 4 (3), pp. 72–78.
5. Guan L., Feng X.L., Xiong G. Engine lubricating oil classification by SAE grade and source based on dielectric spectroscopy data. *Analytica Chimica Acta*. 2008, vol. 628, is.1, pp. 117–120.
6. Kremer F., Schönhals A. (eds). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Berlin, Springer-Verlag Heidelberg GmbH, 2012.
7. Guan L., Feng X. L., Xiong G., Xie J. A. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring. *Sensors and Actuators A: Physiscal*. 2011, vol. 168, is. 1, pp. 22–29.
8. Peter Havran [et al.]. Dielectric Properties of Electrical Insulating Liquids for High Voltage Electric Devices in a Time-Varying Electric Field. *Energies*. 2022, no. 15, p. 391.
9. Bin Du, Qian Liu, Yu Shi, Yushun Zhao. The Effect of Fe₃O₄ Nanoparticle Size on Electrical Properties of Nanofluid Impregnated Paper and Trapping Analysis. *Molecules*. 2020, no. 25, p. 3566.
10. Zasetsky A. Y., Buchner R. Quasi-linear least squares and computer code for numerical evaluation of relaxation time distribution from broadband dielectric spectra. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2011, no. 23, p. 025903.
11. Barthel J., Buchner R. High frequency permittivity and its use in the investigation of solution properties. *Pure & App. Chem*. 1991, vol. 63, no. 10, pp. 1473–1482.
12. Vralstad H. [et al.]. Dielectric Properties of Crude Oil Components. *Energy Fuels*. 2009, no. 23, pp. 5596–5602.

13. Ying-zhong Gong [et al.]. Dielectric submicroscopic phase characterisation of engine oil dispersed in jet fuel based on on-line dielectric spectroscopy. *Lubrication Science*. 2017, vol. 29, is. 5, pp. 335–354.
14. Yuan Zhou [et al.]. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement. *Journal of Applied Physics*. 2014, no. 115, p. 124105.
15. Levi D., Stoyanov Z., Vladikova D. Application of permittivity spectroscopy for screening of motor oils lubricating properties. *Bulgarian Chemical Communications*. 2017, vol. 49, sp. is. C, pp. 254–259.
16. TH2826/A High Frequency LCR-Meter. Operation manual [online]. Available at: http://222.185.248.92:8080/upload/UploadAction2/20200114135540_522.pdf (Accessed 1 April 2023).
17. Gusev Yu. A. *Osnovy dielektricheskoy spektroskopii* [Fundamentals of dielectric spectroscopy]. Kazan', KGU, 2008, 112 p.
18. Provencher S. W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations. *Computer Physics Communications*. 1982, vol. 27 (3), pp. 213–227.
19. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform, 2004. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> (Accessed 26 June 2022).
20. *Motornoe maslo Shell vyazkost'yu 15W-40 – kharakteristiki* [Shell engine oil viscosity 15W-40]. Available at: https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40/ (Accessed 8 October 2023).
21. Mobil 1™x15W-30. Available at: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-x1-5w-30> (Accessed 8 October 2023).
22. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-mda/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (Accessed 8 October 2023).
23. MOBIL™ 10W40. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-10w-40> (Accessed 8 October 2023).
24. *Total Disola M 4015 – motornoe maslo dlya vysoko- i sredneoborotnykh dizeley sudov* [Total Disola M 4015 – motor oil for high and medium speed diesel ships]. Available at: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (Accessed 8 October 2023).
25. Navigo TPEO 12/40. Available at: <http://www.fareastfish.ru/oil/trunk/navigo-tpeo-12-40.html> (Accessed 8 October 2023).
26. *Bazovye masla* [Base oils]. Available at: <https://danalubes.ru/products/base-oils> (Accessed 8 October 2023).
27. Grigorov A. B., Naglyuk I. S. *Ratsional'noe ispol'zovanie motornykh masel* [Rational use of motor oils]. Kharkov, Tochka. 2013, 178 p.
28. Kovalishin F. P. Issledovanie relaksatsii elektricheskikh parametrov otrabotannogo motornogo masla [Study of relaxation of electrical parameters of used engine oil]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2023, no. 2 (39), pp. 1–7.
29. Grigorov A. B., Karnozhitskiy P. V., Naglyuk I. S. Izmenenie dielektricheskoy pronitsaemosti dizel'nykh motornykh masel v ekspluatatsii [Change of dielectric permittivity of diesel engine oils in operation]. *Avtomobil'nyy transport*. 2007, no. 20, p. 3.

30. Sinyavsky N., Kostrikova N. Analysis of the marine engine oils elemental constituents for engine diagnostics, 2023 (in print)

Информация об авторах

О. В. Сынашенко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Н. Я. Синявский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

Н. А. Кострикова – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

Information about the authors

O. V. Synashenko – PhD in Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Physics

N. Ya. Sinyavsky – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Head of the Department of Physics

N. A. Kostrikova – PhD in Physical and Mathematical sciences, Associate Professor, Vice-rector for Research

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accept for publication 20.10.2023.