



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА

Ф. П. Ковалишин, студент,  
e-mail: [kovalishin.2014@mail.ru](mailto:kovalishin.2014@mail.ru),  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В статье приведены результаты исследования судовых моторных масел методами диэлектрической и импедансной спектроскопии с целью диагностики износа узлов судовых двигателей по качеству отработанных моторных масел. Показано, что подходы с использованием частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь дают возможность контролировать свойства моторных масел. Показана возможность использования распределения времен диэлектрической релаксации для регистрации изменений отработавших моторных масел и корреляции времени релаксации с содержанием в масле продуктов износа. Выявлены предположительные причины влияния продолжительности эксплуатации моторных масел на их диэлектрические параметры.

**Ключевые слова:** судовые моторные масла, диэлектрическая и импедансная спектроскопия, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь

### ВВЕДЕНИЕ

Качество судового моторного масла, эксплуатируемого в судовых двигателях, может являться индикатором для диагностики неисправностей узлов двигателей. Причиной этого является наличие в отработанном масле частиц износа металлов трущихся деталей и иных загрязнений. Поэтому для идентификации узла, требующего ремонта или замены, важно знать состав материалов, из которых изготовлены механизмы двигателей.

На данный момент разработан комплекс методов (электрических и магнитных, физических, химических и оптических), посредством которых был бы возможен онлайн-мониторинг состояния смазочного масла на борту судна с дальнейшим прогнозированием оставшегося срока службы дизельного двигателя [1].

Для диагностики двигателя по качеству отработанного масла используются радиоспектроскопический и оптический методы [2], методы ИК-спектроскопии, феррографии и гранулометрический метод [3].

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования работы являются судовые моторные масла, свежие и отработанные различного числа часов.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – изучение возможности применения диэлектрической и импедансной спектроскопии для диагностики судовых масел в процессе отработки в двигателе.

Для достижения данной цели исследования ставились следующие задачи: изучение

состояния отработанных судовых моторных масел по частотной зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ; получение распределения времен диэлектрической релаксации масел как полярных диэлектриков.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В различных областях физики и химии и др. для исследований широко используются методы диэлектрической спектроскопии. Исследования диэлектрических характеристик жидких сред дают ценную информацию о структуре и межмолекулярных взаимодействиях. В переменном электрическом поле на больших частотах в жидких диэлектриках возникают релаксационные явления [4]. Это связано с рассеянием энергии, которая затрачивается на переориентацию диполей в диэлектрике. Время диэлектрической релаксации – это время установления в диэлектрическом образце равновесной ориентации диполей.

Главное преимущество метода диэлектрической спектроскопии состоит в достаточно большом объеме получаемой информации, простоте интерпретации результатов эксперимента и в малых затратах на эксперимент.

В данной работе для измерений использовался современный цифровой измеритель параметров LCR TH2827C (рис. 1). Это мост переменного тока, работающий в интервале частот 20 Гц–1 МГц. В качестве измерительной ячейки использовался стандартный воздушный конденсатор переменной емкости (рис.1 а), погружаемый в исследуемое масло (рис.1 б).



а



б

Рисунок 1 – Прецизионный измеритель LCR TH2827C

Всего было исследовано 5 видов моторных масел – свежих и отработанных разное количество часов, а также 2 базовых масла. Измеренные частотные зависимости параметров (емкости  $C$  в пФ и тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ) через флэш-накопитель переносились для обработки на персональный компьютер. Диэлектрическая проницаемость масла определялась как отношение  $\epsilon = C/C_0$ , где  $C_0$  и  $C$  – емкости воздушного конденсатора и погруженного в среду (исследуемое моторное масло).

Масла можно рассматривать как полярные диэлектрики. Во внешнем переменном электрическом поле, если время установления равновесной ориентации диполей становится больше периода колебаний поля, поляризация образца уменьшается. В нашем эксперименте этот факт подтверждается тем, что с ростом частоты электрического поля величина диэлектрической проницаемости моторного масла уменьшается. Для простых жидкостей спад поляризации характеризуется одним временем релаксации.

Подобно комплексному сопротивлению в электрических цепях с реактивными элементами, диэлектрическая проницаемость вещества  $\epsilon$  также является комплексной величиной, т. е. она имеет действительную  $\epsilon'$  и мнимую  $\epsilon''$  части. Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$  используется для описания поляризации веществ

и потерь в веществе [5]. Тангенс угла диэлектрических потерь среды, заполняющей конденсатор, определяется как отношение  $\text{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ .

Частотную зависимость действительной части относительной диэлектрической проницаемости описывает уравнение Дебая [4]:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon + \varepsilon_\infty \omega^2 T_r^2}{1 + \omega^2 T_r^2} \quad (1)$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $\varepsilon_\infty$  – диэлектрическая проницаемость при  $\omega \rightarrow \infty$ ;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость при  $\omega \rightarrow 0$ ;  $T_r$  – макроскопическое время релаксации.

Моторное масло – сложная полярная жидкость, которая характеризуется несколькими временами релаксации.

Если обозначить функцию распределения времени релаксации через  $G(T_r)$ , можно записать уравнение Дебая в виде:

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

Для определения  $G(T_r)$  необходимо к выражению (2) применить инверсию интегрального преобразования (ИТ). Для этого в работе использован алгоритм программы RILT [6] в среде Math Lab, применяемый ранее в радиоспектроскопии.

Знание функции распределения времени релаксации  $G(T_r)$  позволит анализировать в моторном масле состав присадок и продуктов износа двигателя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для примера на рисунках 2 и 3 представлены зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты для базовых масел SN-150 и SN-500, чистых и отработанных моторных масел Mobil 5W30 и Shell Rimula 15W40. Основные диэлектрические характеристики в начале и конце частотного диапазона для исследованных масел приведены в таблице 1.

Для всех исследуемых моторных масел наблюдалась следующая закономерность: с ростом частоты измерения диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и угол диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  моторных масел уменьшаются.

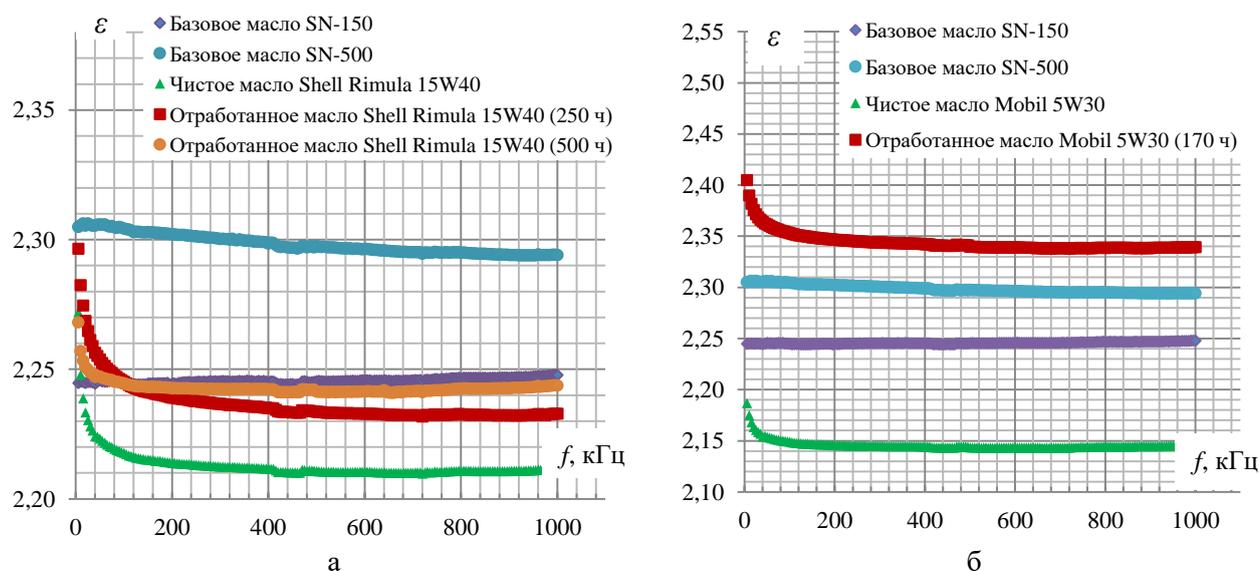


Рисунок 2 – Зависимости относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  от частоты для

базовых масел SN-150, SN-500, масла Shell Rimula 15W40, чистого и отработанного 250 ч и 500 ч (а) и для масла Mobil 5W30, чистого и отработанного 170 ч (б)

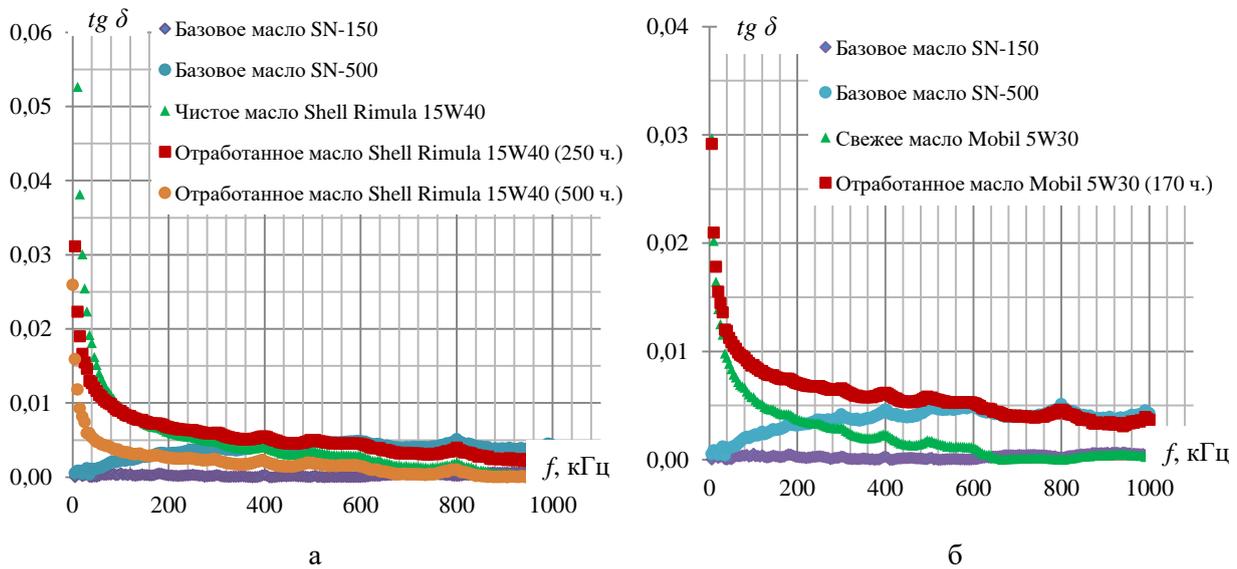


Рисунок 3 – Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты для базовых масел SN-150, SN-500, масла Shell Rimula 15W40, свежего и отработанного 250 ч и 500 ч (а) и для масла Mobil 5W30, свежего и отработанного 170 ч (б)

Моторные масла представляют собой базовое масло и многокомпонентную дисперсную систему присадок для улучшения его эксплуатационных характеристик. Молекулы базовых масел состоят из связанных атомов с равномерным распределением зарядов и являются неполярными. Это приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь базовых масел SN-150 и SN-500 не зависят от частоты. Для базовых масел характерны пологие зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты, в отличие от моторных масел с присадками.

Таблица 1 – Измеренные диэлектрические характеристики свежих и отработанных моторных масел

№ п/п	Наименование масла	Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$		Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$ $f = 1 \text{ МГц}$
		$f = 200 \text{ ГГц}$	$f = 1 \text{ МГц}$	
1	Shell Rimula 15W40			
	Свежее	2,5996	2,2115	0,00077
	отработанное 250 ч	2,3059	2,2328	0,00280
	отработанное 500 ч	2,2811	2,2437	0,00031
2	Mobil 5W30			
	Свежее	2,1747	2,1455	0,00035
	отработанное 170 ч	2,4095	2,3392	0,00369
3	Mobil 5W40			
	Свежее	2,2056	2,1275	0,00008
	отработанное 160 ч	2,3418	2,2983	0,00407
4	Total ISOLO			
	Свежее	2,2811	2,2350	0,00240
	отработанное 300 ч	2,3395	2,2709	0,00279
5	ТПЕО 12/40			
	Свежее	2,2832	2,2596	0,0048

	отработанное 300 ч	2,5733	2,4838	0,0101
6	Масло базовое SN-150	2,2207	2,2477	0,00049
7	Масло базовое SN-500	2,2855	2,2940	0,00428

Также следует отметить, что результаты нашего эксперимента и литературные данные [7] говорят об увеличении величины диэлектрической проницаемости с ростом времени эксплуатации масла в двигателе (рис. 4). Это вызвано окислением углеводородов масла и появлением в нем частиц износа металлов трущихся деталей и иных загрязнений, имеющих большую удельную электропроводность.

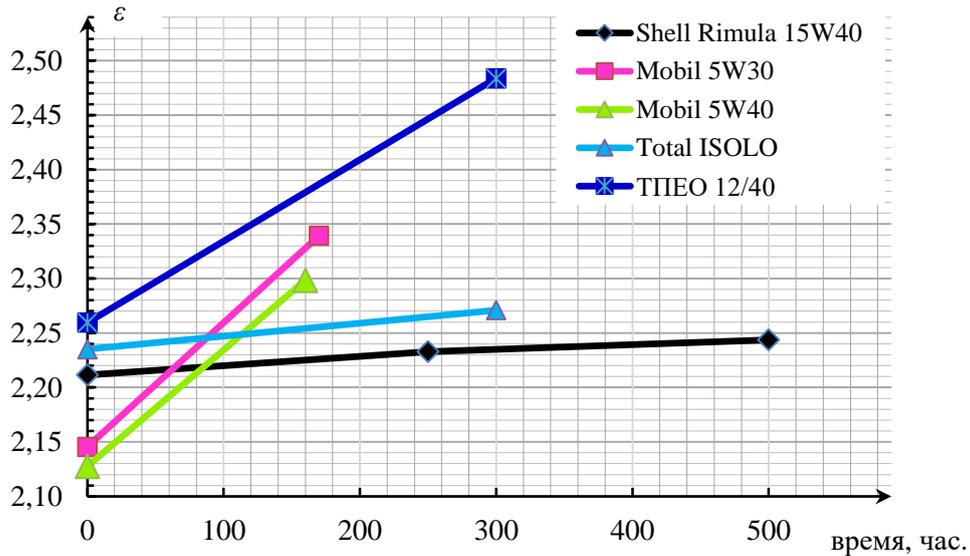


Рисунок 4 – Увеличение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  судовых масел при  $f = 1$  МГц в зависимости от времени наработки

Результаты инверсии интегрального преобразования (2), выполненные с помощью алгоритма RILT в среде МатЛаб, приведены для свежих и отработанных масел на рисунке 5.

Релаксация диэлектрической проницаемости свежих и отработанных масел вызвана наличием металлосодержащих присадок в маслах. Об этом свидетельствует значительное количество сульфатной золы в составе масел [8].

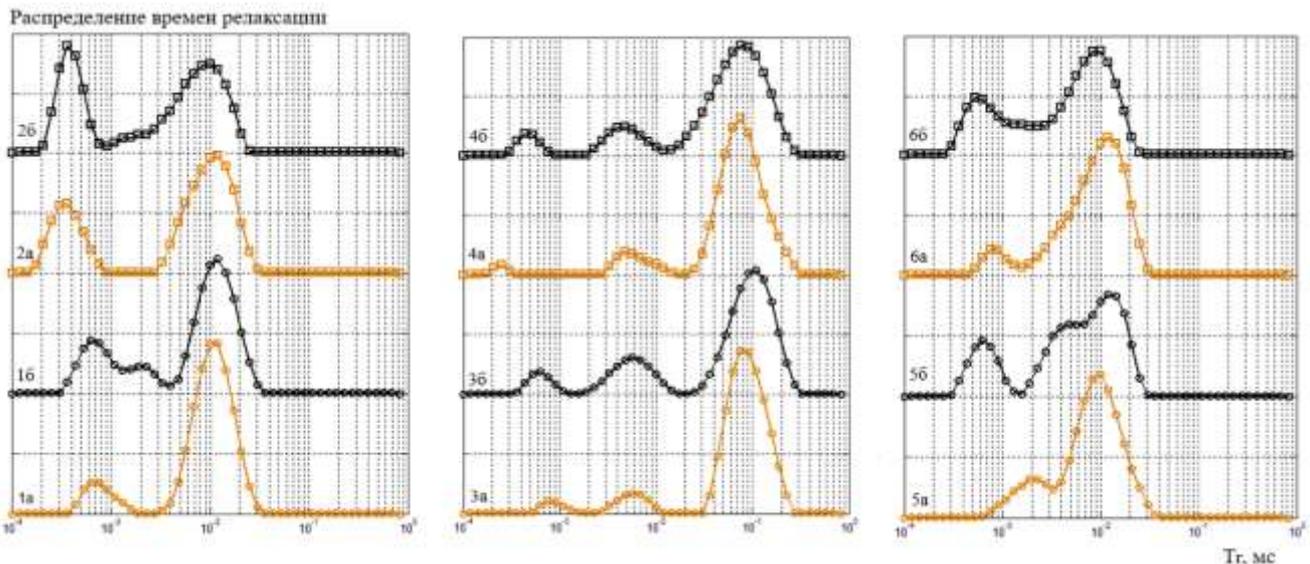


Рисунок 5 – Распределение времени релаксации диэлектрической проницаемости свежего (°) и

отработанного (°) масла Total ISOLO (кривые 1а и 1б), ТПЕО12/40 (2а, 2б), Mobil 15W40 (3а, 3б), Shell Rimula 15W40 (4а, 4б), Mobil 5W30 (5а, 5б) и Mobil 5W40 (6а и 6б)

Молекулы присадок – полярные. Так как присадок несколько, диполи различных молекул присадок имеют разный размер, а, значит, и скорость, с которой переориентируются диполи в электрическом поле, разная. По этой причине на графиках распределения времен релаксации наблюдаются по два или три пика (рис. 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые показана возможность использования распределения времен диэлектрической релаксации для идентификации масел, а также возможность регистрации изменений отработавших моторных масел и корреляции времени релаксации с другими характеристиками, в частности, с содержанием продуктов износа.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке контрольно-измерительных приборов для экспресс-диагностики двигателя.

Практическая значимость результатов исследования состоит в возможности диагностики износа узлов двигателя по качеству отработанного масла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu, J. Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems / J. Zhu, D. He, E. Bechhoefer // Journal of Chemical Science and Technology. – 2013. – V. 2(3). – P. 100-115.
2. Синявский, Н. Я. Анализ частиц продуктов износа в отработанных судовых моторных маслах / Н. Я. Синявский, А. М. Иванов, Н. А. Кострикова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 4(4). – С. 44-48.
3. Oil Analysis Handbook for Predictive Equipment Maintenance. [https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci\\_OilAnalysisHandbook\\_FINAL\\_2014-08.pdf](https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf) [Электронный ресурс]. – 2014.
4. Гусев, Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие / Ю. А. Гусев. – Казань: КФГУ, 2008. – 112 с.
5. Импедансная спектроскопия: теория и применение: учеб. пособие / Ю. В. Емельянова, М. В. Морозова, З. А. Михайловская, Е. С. Буянова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 156 с.
6. Provencher, S. W. A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations / S. W. Provenche // Computer Physics Communications. – 1982. – Vol. 27(3). – P. 213-227.
7. Григоров, А. Б. Рациональное использование моторных масел: монография / А. Б. Григоров, И. С. Наглюк. – Харьков: НТУ–ХПИ, 2012. – 183 с.
8. Григоров, А. Б. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации / А. Б. Григоров, П. В. Карножицкий, И. С. Наглюк И.С. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 25. – С.169–175.

### STUDY OF RELAXATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF USED ENGINE OIL

F. P. Kovalishin, student,  
e-mail: [kovalishin.2014@mail.ru](mailto:kovalishin.2014@mail.ru),  
Kaliningrad State Technical University

The article presents the results of a study of marine motor oils using dielectric and impedance spectroscopy methods in order to diagnose the wear of marine engine components by the

quality of used motor oils. It is shown that approaches using the frequency dependences of the permittivity and the dielectric loss tangent make it possible to control the properties of motor oils. A possibility of using dielectric relaxation times distribution to register changes in used motor oils and correlation of relaxation times with the content of wear products in the oil is shown. The hypothetical reasons for the influence of the duration of motor oils operation on their dielectric parameters have been clarified.

**Keywords:** *marine engine oils, dielectric and impedance spectroscopy, relative permittivity, dielectric loss tangent*