



## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СУДОВЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

В статье исследованы судовые смазочные материалы методом диэлектрической спектроскопии с целью контроля качества и для диагностики неисправностей судовых двигателей по отработанным моторным маслам. Изучена возможность применения диэлектрических характеристик для оценки старения моторного масла. Показано, что подходы с использованием диэлектрических параметров дают возможность контролировать свойства моторных масел. Показана возможность применения относительной диэлектрической проницаемости отработавших моторных масел в качестве индикатора, характеризующего комплексные изменения их состава. Выявлены предположительные причины влияния продолжительности эксплуатации моторных масел на их диэлектрические параметры. Полученные результаты показывают, что метод дает информацию, которая может быть использована для тестирования судовых нефтепродуктов и для диагностики состояния агрегатов судового двигателя с применением отработанного моторного масла.

**Ключевые слова:** судовые нефтепродукты, диэлектрические параметры, отработанные смазочные материалы

### ВВЕДЕНИЕ

Масло судовых дизельных двигателей можно использовать как среду для диагностики неисправностей узлов, т.к. оно содержит частицы, образующиеся в результате износа. Знание материалов конструкции механизмов по результатам анализа отработанного масла позволяет идентифицировать узел, требующий ремонта или замены.

Изменения свойств масла и его состава с течением времени работы дизеля дают возможность обнаруживать его неисправности. Метод не предполагает доставку судна к месту ремонта и разборку двигателя для визуального определения дефектов. Об износе деталей двигателя показывает наличие в отработанном масле частиц из соответствующих материалов.

Методам диагностики состояния смазочных материалов посвящено большое количество публикаций. Одним из обзоров таких методов является работа [1]. Рассмотренные методы анализируются и подразделяются на четыре категории: электрические (магнитные), физические, химические и оптические методы. Конечная цель всех разрабатываемых сенсорных систем – добиться онлайн-мониторинга состояния смазочного масла на борту и прогнозирования оставшегося срока службы.

Большое количество способов анализа масла во время его эксплуатации приведено в справочнике [2]. Чаще других для диагностики двигателя по маслу используются метод феррографии, метод ИК-спектроскопии и гранулометрический метод.

Повышению эксплуатационной безопасности судов путем совершенствования методов анализа моторных масел судовых двигателей с целью их диагностики посвящен цикл работ с использованием радиоспектроскопических и оптических методов [3, 4].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования работы являются судовые нефтепродукты: смазочные материалы, моторное, гидравлическое и трансформаторное масла.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – изучение состояния отработанных судовых моторных масел в зависимости от времени работы двигателя с помощью метода диэлектрической спектроскопии.

Для достижения данной цели исследования ставились следующие задачи: изучить возможности диэлектрической и импедансной спектроскопии для диагностики судовых нефтепродуктов; изучить характер изменения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь судовых масел в процессе отработки в двигателе.

Значимость результатов исследования для практики заключается в возможности использования  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  для определения качества нефтепродуктов и для диагностики узлов двигателя по отработанному маслу.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В различных областях физики, химии, биологии и др. для исследований широко используются методы диэлектрической спектроскопии. Исследования диэлектрических характеристик жидких сред дают ценную информацию о структуре и межмолекулярных взаимодействиях.

На больших частотах в жидких диэлектриках возникают релаксационные явления в электрических полях [5]. Это связано с рассеянием энергии, которая затрачивается на переориентацию диполей в диэлектрике. Время установления в образце равновесной ориентации и есть время диэлектрической релаксации.

В данной работе для измерений использовался цифровой измеритель параметров LCR E7-8. Прибор является мостом переменного тока. Измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь выполнялись на частоте 1 кГц.

Исследуемые моторные масла и процессы в них могут быть описаны с помощью импеданса:  $Z = Z' - j \cdot Z''$ , где  $Z'$  – действительная часть, независимая от частоты и  $Z''$  – мнимая часть импеданса, зависящая от частоты. Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$  используется для описания поляризации веществ и потерь.

Зависимость компонент импеданса от частоты имеет следующий вид [6]:

$$Z' = \frac{\epsilon''}{\omega C_0 (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)}, Z'' = \frac{-\epsilon'}{\omega C_0 (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)} .$$

В этих выражениях  $C_0$  – емкость пустого конденсатора, используемого в качестве датчика. Тангенс угла диэлектрических потерь среды, заполняющей конденсатор  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ . Варьирование частот электрического поля позволяет исследовать диэлектрические и транспортные свойства материалов. Для этого применяются мостовые, резонансные и волноводные экспериментальные методики.

Основные преимущества метода диэлектрической спектроскопии – в достаточно большом объеме получаемой информации, простоте интерпретации результатов и в малых затратах на эксперимент.

В данной работе для оценки состояния работавшего масла использованы относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ .

Диэлектрические характеристики моторных масел определяются их химическим составом. Для придания маслам желаемых свойств в них добавляют присадки (загущающие, моющие, антифрикционные, антиокислительные и т.д.). Из-за наличия присадок диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  для масел с присадками значительно выше, чем для базовых моторных масел. Таблица иллюстрирует этот факт.

Таблица – Измеренные диэлектрические характеристики свежих и отработанных нефтепродуктов

№ п/п	Наименование	Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$	Коэффициент диэлектрических потерь, $k_{\text{п}}$
1	Масло М 4015 свежее	2,325	0,438	1,018
2	Масло М 4015, отработанное 300 час	2,283	0,116	0,265
3	Масло гидравлическое чистое	2,269	0,430	0,976
4	Масло гидравлическое, отработанное 250 час	2,246	0,211	0,474
5	Масло базовое SN-150	2,140	0,030	0,064
6	Масло базовое SN-500	2,163	0,005	0,011
7	Дизельное масло 15/40 Mobil	2,225	0,138	0,307
8	Масло 15/40 Mobil с фильтра Mann при замене	2,237	0,059	0,132
9	Mobil 10W-40, чистое	2,483	0,259	0,643
10	Mobil 10W-40, отработанное 300 час	2,460	0,118	0,290
11	Трансмиссионное 80W-90	2,513	0,243	0,611
12	Масло 15W-40, чистое	2,513	0,176	0,442
13	Масло 15W-40, отработанное 250 час	2,495	0,155	0,387
14	Масло 15W-40, отработанное 500 час	2,483	0,133	0,330
15	Гидравлическое масло VG-32	2,444	0,108	0,264
16	Дизельное топливо, летнее	2,411	0,103	0,248

О наличии металлосодержащих присадок в моторных маслах можно судить по значению сульфатной золы [7]. В процессе эксплуатации двигателя масло подвержено испарению, окислению и процессу крекинга. В масле появляются продукты износа трущихся узлов и сажи. В масло попадают также вода, топливо и пыль. Эти примеси влияют и на  $\epsilon$ , и на  $\text{tg}\delta$  отработавшего масла.

Для изучения изменений  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  в процессе эксплуатации судового дизеля мы взяли нефтепродукты, приведенные в таблице. В этой же таблице приведены  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и коэффициенты диэлектрических потерь в отработанных маслах в зависимости от времени. Из таблицы видно, что диэлектрическая проницаемость существенно зависит от вида моторного масла.

Во всех рассмотренных нами случаях, как показали исследования,  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  моторного масла убывают со временем его эксплуатации в дизеле. То есть поляризуемость отработанного масла как диэлектрика и проводимость постепенно уменьшаются.

В разных маслах с течением времени работы агрегатов разная скорость уменьшения коэффициента диэлектрических потерь (рисунок). Быстрее всего этот параметр убывает для судового масла М 4015. За 300 часов наработки он уменьшается в четыре раза. Медленнее всего коэффициент  $k_{\text{п}}$  уменьшается для масла 15W-40. За 500 часов наработки уменьшение всего в 1,3 раза.

На электрические свойства отработанного масла существенным образом влияет наличие в нем сажи. При увеличении в масле количества сажи от 1% до 5% его относительная

диэлектрическая проницаемость увеличивается почти в два раза.

При выработке диспергирующих присадок и большом содержании сажи в масле происходит агломерация сажи в крупные частицы, приводящие к абразивному воздействию на детали двигателя.

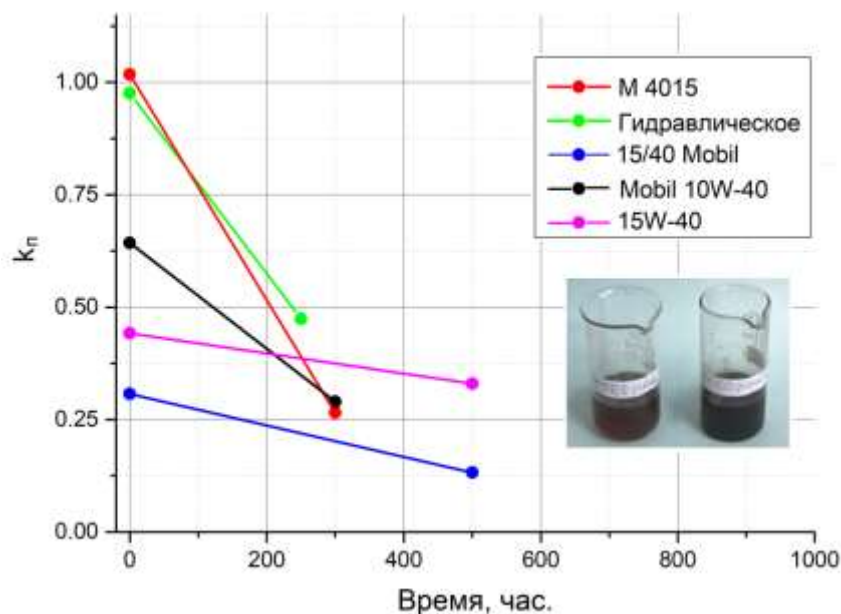


Рисунок – Уменьшение коэффициента диэлектрических потерь судовых масел в зависимости от времени наработки

Наличие сажи в масле значительно изменяет его проводимость и диэлектрическую проницаемость. С ростом содержания сажи диэлектрическая проницаемость моторного масла тоже растёт.

Диэлектрическая проницаемость масла подвержена воздействию таких загрязнений, как: вода, сульфатная зольность, продукты износа, коксуетость, а также антиокислительных и моющих присадок. Причем эти факторы могут оказывать разнонаправленное воздействие на диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь масла.

Как видно из таблицы, тангенс угла диэлектрических потерь у отработанного масла снижается. Эти потери вызваны, главным образом, моющими и диспергирующими присадками. Присадки обладают щелочными свойствами, препятствующими образованию отложений и нейтрализации агрессивного действия кислот, образующихся при работе двигателя. Щелочное число используемых присадок определяется количеством гидроксида калия в мг на 1 г масла (мг КОН/г). При работе двигателя щелочное число масла неизбежно снижается, нейтрализующие это снижение присадки срабатываются. Такое снижение щелочного числа, при достижении определенных пределов, приводит к тому, что масло утрачивает свою работоспособность.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значение результатов исследования для практики заключается в возможности их использования в качестве дополнительного материала при исследованиях свойств отработанных судовых моторных масел при разработке методик по обнаружению неисправностей судовых дизельных двигателей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность применения относительной диэлектрической проницаемости отработавших моторных масел в качестве индикатора, характеризующего комплексные изменения их состава. Выявлены предположительные причины влияния

продолжительности эксплуатации моторных масел на их диэлектрические параметры.

Полученные результаты позволяют устанавливать связь между электрическими свойствами отработанного масла и износом деталей и узлов двигателя, приводящим к неисправностям. Установлены основные параметры загрязнений масла, вызванные образованием в камере сгорания дизельного двигателя большого количества сажи и частиц износа. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке контрольно-измерительных приборов для диагностики агрегатов двигателя по отработанному маслу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu J. Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems/ Zhu J., He D., Bechhoefer E.// Journal of Chemical Science and Technology.- 2013.- v. 2(3).- p. 100-115.
2. 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.
3. 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.
4. Синявский, Н.Я. Исследование изменений моторного масла в процессе эксплуатации судового двигателя методом ЯМР высокого разрешения / Н.Я. Синявский // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т. 42(4). – С. 91-97.
5. Гусев, Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учебное пособие / Ю.А. Гусев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Казан. федер. ун-т. – Казань: Изд-во Казан. федер. ун-та, 2008. – 112 с.
6. Импедансная спектроскопия: теория и применение: учеб. пособие / Ю.В. Емельянова, М. В. Морозова, З. А. Михайловская, Е. С. Буянова; под общ. ред. Е. С. Буяновой; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 156 с.
7. Григоров, А.Б. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации / А.Б. Григоров, П.В. Карножицкий, И.С. Наглюк // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – №25. – С.169–175.

#### DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF MARINE LUBRICANTS

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

The article investigates marine lubricants by the method of dielectric spectroscopy for the purpose of quality control and for diagnosing malfunctions of marine engines using used motor oils. The possibility of using dielectric characteristics to assess the aging of engine oil has been studied. It is shown that approaches using dielectric parameters make it possible to monitor the properties of motor oils. The possibility of using the relative permittivity of used motor oils as an indicator characterizing complex changes in their composition is shown. The hypothetical reasons for the influence of the duration of operation of motor oils on their dielectric parameters are found out. The results obtained show that the applied method provides information that can be used for testing marine oil products and for diagnosing the condition of marine engine units using used engine oil.

**Key words:** marine oil products, dielectric parameters, used lubricants