

УДК 629.3:[53.098/665.765]

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ РАБОТАЮЩЕГО МАСЛА

**Власов Ю.А.**

*ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия (634003, Томск, пл. Соляная, 2), e-mail: yury2006@yandex.ru*

---

В статье выполнен теоретический анализ диэлектрической проницаемости среды смазочного масла в зависимости от загрязняющих компонентов. В процессе эксплуатации смазочное масло загрязняется продуктами износа, окисления, водой и моторным топливом. Загрязняющие компоненты способны характеризовать техническое состояние агрегата, в котором работало масло, в зависимости от неисправности агрегата. Продукты загрязнения изменяют диэлектрические свойства работающего масла. Состояние работающего масла можно оценивать, помещая его в электрическое поле между обкладками конденсатора. На электрическую емкость оказывает влияние эффективная диэлектрическая проницаемость загрязненного масла. Оценить диэлектрическую проницаемость загрязненного масла возможно перечнем эмпирических зависимостей, которые целесообразно использовать при имитационном моделировании. Предлагаемые модели расчета эффективной диэлектрической проницаемости загрязненного масла можно положить в основу приборов диагностики, которые будут способны оценивать присутствие загрязняющих компонентов.

---

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, смазочное масло, диагностика, машина.

## THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON DIELECTRIC PERMEABILITY OF WORKING OIL

**Vlasov Y.A.**

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia (634003, Tomsk, Solyanaya square, 2), e-mail: yury2006@yandex.ru*

---

The theoretical analysis of dielectric permeability of the environment of lubricant oil, which depends on polluting components, is executed in article. Lubricant oil becomes soiled products of wear, oxidation, water and motor fuel, at car operation. In lubricant oil, polluting components characterize technical condition of the car and its malfunction. Products of pollution change dielectric properties of working oil. Working oil between condenser electrodes in electric field can be estimated. Effective dielectric permeability of the polluted oil has impact on the electric capacity of the condenser. At imitating modeling, it is possible to use some formulas, which estimate dielectric permeability of lubricant oil. In the basis of the device, which diagnoses cars on impurity of working oil, is offered to use imitating models for calculation of dielectric permeability of environment of lubricant oil.

---

Keywords: dielectric permeability, lubricant oil, diagnostics, car.

**Введение.** Смазочное масло является полноправным конструкционным компонентом узла трения машины. Масло находится в постоянном контакте не только с поверхностями трения, но и с целым рядом других поверхностей, находящихся в агрегате машины, которые оставляют свой отпечаток присутствия, если происходит нарушение герметичности замкнутой системы смазки агрегата. При эксплуатации машины происходит изменение физико-химических свойств масла, обуславливающих ухудшение эксплуатационных характеристик смазки, повышенное изнашивание деталей, активацию процессов окисления и полимеризации и др.

Физико-химические методы анализа масла позволяют оценивать изменения свойств смазочной среды, связанных, главным образом, с окислением масла и его загрязнением в зависимости от нарушения технического состояния агрегата машины.

Налаженная на транспорте система диагностирования машин физико-химическими методами анализа масла за последние двадцать лет сильно изменилась. Реорганизация крупных транспортных предприятий в мелкие компании разрушила систему диагностического контроля агрегатов машин по параметрам работающего масла (ПРМ). Отсутствие диагностического контроля машин по ПРМ как отдельной службы производственно-технической базы, не исключает данный вид работ технического обслуживания из рекомендуемого перечня технических воздействий. Таким образом, отсутствие специализированной службы контроля машин по ПРМ является одной из проблем, снижающей надежность агрегатов машин. Решать эту проблему можно, разрабатывая и внедряя новые универсальные средства экспресс-диагностики.

**Постановка проблемы.** Большинство применяемых методов анализа работающего масла определяют такие оценочные параметры, как загрязненность масла водой, моторным топливом, продуктами износа и полимеризации, а также дорожной пылью. При этом используются лабораторные методы анализа, которые достаточно трудоемки, требуют обученного персонала, подготовленного помещения, наличия специальной посуды и химических реактивов [6].

Если учесть, что сегодня на транспорте большинство предприятий не в состоянии материально содержать специализированные лаборатории диагностического контроля машин по ПРМ, а существующие автосервисы не включают в реестры выполняемых услуг контроль агрегатов машин по ПРМ, то выполнение лабораторных методов физико-химического анализа масла становится практически не возможным. Однако целесообразность диагностики агрегатов машин по ПРМ очевидна, и диагностирование должно выполняться с использованием портативных высокопроизводительных средств измерения, которые должны быть универсальными, простыми при выполнении анализа масла, не должны быть зависимы от специализированного помещения и дополнительного штата сотрудников.

Теоретические исследования настоящей работы позволяют в основу разработки новых средств измерения и совершенствования существующих конструкций положить принципы взаимодействия химических свойств смазочного масла с электрическим полем, которое воздействует на смазочную среду и позволяет оценивать изменения, происходящие в масле в процессе его эксплуатации. В частности, исследовательский интерес представляет

диэлектрическая проницаемость масляной среды, изменение которой происходит в зависимости от изменений условий эксплуатации смазочного масла.

**Решение поставленных задач.** Нефтяное смазочное масло имеет ничтожно малую электропроводность, в нем нет свободных электронов, и поэтому оно является диэлектриком [1]. Тем не менее, внутри молекул распределение зарядов может быть различным. Молекулы базовой основы нефтяных масел имеют ковалентные связи и распределяют заряды между атомами равномерно, т.е. обладают неполярной связью. При деструкции основы масла, ковалентные связи разрушаются, заряды смещаются в ту или иную сторону молекулы или молекулярного соединения, образуется полярная связь.

Полярные молекулы (диполи), образованные после деструкции масляной среды, имеют на концах разные по знаку заряды. Если некоторый исследуемый объем работающего масла поместить между обкладками конденсатора и создать разность потенциалов, то полярные молекулы стремятся развернуться по направлению действия электрического поля  $E$ . Такая ориентация молекул поляризует масляную среду, т.е. образуются противоположные электрические полюсы на обкладках конденсатора, вследствие возникновения на них поляризационных зарядов. Поляризационные заряды создают поле  $E_p$ , направленное противоположно полю, которое было создано зарядами на обкладках конденсатора до помещения смазочного масла. Чем сильнее поле  $E_p$  ослабляет первоначальное поле  $E$ , тем больше диэлектрическая проницаемость смазочного масла.

Смазочные масла в процессе работы претерпевают существенные структурные изменения [8]. Если соблюдено условие, когда масляная среда идеально неполярна, а постороннее вещество, загрязняющее масло, полярно, то диссоциации не будет. Разрушение структуры масляной среды будет происходить за счет окислительных процессов (например, при изменении температурного режима) и путем загрязнения масла посторонними веществами. Образованные полярные примеси, в этом случае, способствуют ионной проводимости масляной среды. В том случае, когда полярные загрязняющие вещества попадают в масляную среду, в которой находится некоторое количество собственных полярных молекул, то диполи масляной среды своими заряженными концами притягиваются к ориентированным зарядам молекул загрязняющего вещества. Под действием электростатических сил диполей масла, молекула загрязняющего вещества способна разорваться на ионы. Образовавшиеся ионы стремятся обратно притянуться друг к другу, но сила взаимодействия между разноименными зарядами тем слабее, чем больше диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  [3].

Рассмотрев работающее масло с позиции химии диэлектриков, приходим к выводу, что масло можно оценивать через показатели диэлектрической проницаемости, которые характеризуют состояние масла в зависимости от изменения его исходного состава.

**Методы исследования.** Основными внешними факторами, которые естественным образом влияют на диэлектрическую проницаемость работающего масла, являются температура, давление и влажность. Рост температуры и давления повышает диэлектрическую проницаемость смазочного масла. Однако, если оценка свойств масла выполняется в одинаковых условиях, то температура и давление будут малозначимыми, а на значение оценочного параметра будет влиять концентрация воды в масле. При этом учитывалось, что работающее масло насыщается влагой не только естественным путем, но и от нарушения технического состояния агрегата, например, от нарушения герметичности в системе охлаждения двигателя машины.

Практика показывает, что условия эксплуатации различных диэлектрических материалов, в нашем случае работающих масел, очень часто приводят к образованию смесей с новыми приобретенными свойствами. Как правило, это двухкомпонентные (или большего числа) смеси, диэлектрическая проницаемость которых неизвестна.

В нашем случае, расчеты диэлектрической проницаемости смеси сводятся к моделям, определяемым через емкости конденсаторов, состоящих из двух различных диэлектриков,

которые могут быть соединены между собой либо параллельно –  $C^* = \frac{\epsilon^* \epsilon_0 (S_1 + S_2)}{d}$ , либо

последовательно –  $C^* = \frac{\epsilon^* \epsilon_0 S}{d_1 + d_2}$ . Здесь:  $\epsilon^*$  – эффективная диэлектрическая проницаемость

неоднородного диэлектрика;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $S$ ,  $S_1$  и  $S_2$  – площади электродов;  $d$ ,  $d_1$  и  $d_2$  – толщины слоев с диэлектрическими проницаемостями смазочного масла  $\epsilon_1$  и загрязнителя  $\epsilon_2$ .

Если представить диэлектрик в виде работающего масла с элементами загрязнения, приобретенными в процессе эксплуатации, то становится ясно, что вышеприведенные зависимости для практической реализации не подходят. У композиционных диэлектриков, представляющих собой смесь с неупорядоченными компонентами, истинное значение диэлектрической проницаемости определяется между статистическими значениями смесей. Тогда закладываемые в средства измерения принципы дифференцирования масла и загрязняющих компонент будут рассчитываться с учетом концентраций смазочного масла  $v_1$  и загрязняющего компонента  $v_2$ . Для этих расчетов целесообразно использовать ряд эмпирических зависимостей [2, 4, 5, 7], которые представлены в таблице.

Таблица

## Формулы для расчета эффективной диэлектрической проницаемости среды

Зависимость	Формула	Условия применения
Винера	$\frac{1}{\sum_{i=1}^{i=m} \frac{v_i}{\epsilon_i}} \leq \epsilon^* \leq \sum_{i=1}^{i=m} v_i \epsilon_i$	для $m$ компонентов
	$\frac{\epsilon^* - 1}{\epsilon^* + z} = \sum_{i=1}^{i=m} v_i \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + z}$	$z \neq 2$
Лихтенеккера-Ротера	$\lg \epsilon^* = v_1 \lg \epsilon_1 + v_2 \lg \epsilon_2$	для двух компонентов
	$\lg \epsilon^* = \sum_{i=1}^{i=m} v_i \lg \epsilon_i$	для $m$ компонентов
	$\lg \epsilon^* = \frac{\rho^*}{\rho} \lg \epsilon$	для вспененного материала
Ландау-Лифшица	$\sqrt[3]{\epsilon^*} = \sum_{i=1}^{i=m} v_i \sqrt[3]{\epsilon_i}$	для $m$ компонентов
Беера	$\sqrt{\epsilon^*} = \sum_{i=1}^{i=m} v_i \sqrt{\epsilon_i}$	для $m$ компонентов
Лорентца-Лорентца	$\frac{\epsilon^* - 1}{\epsilon^* + 2} = \sum_{i=1}^{i=m} v_i \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + 2}$	для неполярных диэлектриков
Бётгхера	$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{3\epsilon^*}{\epsilon_i + 2\epsilon^*} = 1$	для $m$ компонентов
Оделевского	$\epsilon^* = A + \sqrt{A^2 + \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{2}},$ $A = \frac{1}{4} [(3v_1 - 1)\epsilon_1 + (3v_2 - 1)\epsilon_2]$	для хаотически расположенных частиц в смеси
	$\epsilon^* = \epsilon_1 \left( 1 + \frac{v_2}{\frac{1-v_2}{3} + \frac{v_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right)$	для матричного расположения частиц в смеси
Максвелла-Вагнера	$\epsilon^* = \epsilon_1 \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2 + 2v_2(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2 - v_2(\epsilon_2 - \epsilon_1)}$	для матричного расположения частиц
Парнаса	$\lg \epsilon^* = v_1 \lg \epsilon_1 + (1 - v_1) \lg \epsilon_2$	$\epsilon_1$ и $\epsilon_2$ мало отличимые
Релея	$\epsilon^* = \epsilon_1 \left( 1 + 3v_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)$	для матричного расположения частиц в смеси, $v \ll 1$
Брюггемана	$\epsilon^* = \frac{\epsilon_1}{(1 - v_2)^3}$	для металлических частиц, $v \ll 1$ и $\epsilon_2 \rightarrow \infty$
Экспериментальная	$\epsilon^* = \epsilon_1 (1 + 3v_2)$	

Выбор формулы для корректного описания диэлектрической проницаемости статистической смеси должен выполняться при соблюдении двух условий.

1 условие – постулат пропорциональности Винера – значение  $\epsilon^*$  должно меняться в одинаковом соотношении с изменением значений  $\epsilon_i$  всех  $i$ -х компонентов смеси. Это условие должно выполняться также и при подстановке соответствующих абсолютных диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_0\epsilon_i$  и  $\epsilon_0\epsilon^*$ .

2 условие – симметричность в отношении всех компонентов смеси, т.е. значение  $\epsilon^*$  не должно меняться в зависимости от изменения того или иного компонента, характеризуемого индексом  $i$ .

Если компоненты смеси одинаковы и значения  $\epsilon_i$  равны между собой, то и  $\epsilon^*$  смеси будут совпадать с этим единственным значением. Если смесь состоит из одного компонента, то  $m=1$  и  $\nu=1$ , а значения  $\epsilon^* = \epsilon_i$ .

**Результаты исследования.** Смазочное масло в процессе длительной работы и нарушения технического состояния механизма подвергается деструкции и загрязнению.

Формула Оделевского для двухкомпонентных статистических смесей, в которых загрязняющие компоненты расположены хаотически (или в растворенном состоянии), не образуя никаких регулярных структур, целесообразно использовать для оценки загрязнения работающего масла бензином или дизельным топливом.

Хаотически рассеянные примеси, рассматриваемые как дисперсная фаза, совместно с однородной дисперсионной средой работающего масла, будут представлять собой диэлектрическую матрицу с элементами включений второго диэлектрика не соприкасающимися между собой. Тогда расчет сводится к определению диэлектрической проницаемости матричной смеси.

При рассмотрении матричных смесей формулы статистических систем дают вполне удовлетворительные результаты. Однако для матричных смесей приемлемы специальные формулы расчета диэлектрической проницаемости среды, которые не всегда удовлетворяют условию симметричности для компонентов смеси.

Если в диэлектрике дисперсионной среды с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  будут равномерно распределены по объему шарообразные включения с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ , то диэлектрическую проницаемость матричной смеси можно определить по формуле Максвелла – Вагнера.

Практическое применение для определения матричной смеси, в которой одна фаза образует связанную матрицу при любой объемной концентрации этой фазы, не равной нулю, имеет формула Оделевского.

Определение диэлектрической проницаемости матричных систем представляет интерес в том случае, если дисперсная фаза в дисперсионной среде является диэлектриками: вода, песок, продукты неполного сгорания топлива, продукты окисления или полимеризации. Но если дисперсная фаза включений является проводником, например, продукт износа металлических деталей, то необходимо применять другие формулы расчета. Так как понятие диэлектрической проницаемости проводника не имеет физического смысла, то для расчета  $\epsilon^*$  диэлектрических матриц с проводящими включениями следует положить, что  $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ . И в этом случае можно использовать упрощенную формулу Брюггемана.

Для расчета диэлектрической проницаемости смеси, в ряде случаев, приходится использовать не объемное содержание компонентов смеси  $v_i$ , а их массовое содержание  $\vartheta_i$ .

В таком случае, используется арифметическая пропорциональность  $v_i = \vartheta_i \frac{\rho^*}{\rho_i}$  (где  $\rho^*$  и  $\rho$  – плотность загрязняющего компонента и материала среды).

Условием применения массовых концентраций является предположение, что смесь – это физическое вещество, и ее компоненты (продукты износа и загрязнения) не вступают в химическое взаимодействие друг с другом.

Оценка нефтепродуктов по изменению их диэлектрической проницаемости, в настоящее время положена в основу ряда электрофизических методов контроля – диэлькометрического, кондуктометрического и колориметрического [9]. Методы являются косвенными, и, главным образом, оценивают концентрацию влаги в нефтяном сырье и нефтепродуктах.

**Выводы.** Выполненный теоретический анализ, оценивающий диэлектрическую проницаемость работающего масла в зависимости от наличия загрязняющих компонентов, позволяет заложить физические принципы определения концентраций загрязняющих компонентов в масле на стадиях имитационного моделирования и при проектировании средств диагностирования. Предлагаемые в работе принципы можно заложить в основу резонансных средств диагностирования, работающих по схеме разностной частоты колебательного контура, при сравнении диэлектрических свойств свежего масла со свойствами работающего масла. Внедрение таких средств диагностики в эксплуатацию, контролирующих состояние машин через свойства работающего масла и имеющих универсальное назначение и портативную компоновку, будет способствовать налаживанию служб диагностики машин по ПРМ, без организации дополнительной производственной структуры на транспорте.

## Список литературы

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
2. Киселев В.Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
3. Майофис И.М. Химия диэлектриков. – М.: Высш. школа, 1970. – 332 с.
4. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1958. – 896 с.
5. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). – М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1948. – 500 с.
6. Соколов А.И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко, В.А. Аметов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1991. – 200 с.
7. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
8. Тупотилов Н.Н., Остриков В.В., Жилин В.В. Особенности кинетики «старения» работающих моторных масел // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 3. – С. 32–33.
9. Эме Ф. Диэлектрические измерения. – М.: Химия, 1967. – 224 с.

### Рецензенты:

Ананин В.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», декан механико-технологического факультета Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск.

Саркисов Ю.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Химии» Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск.