

А. В. МАМЫКИН, д. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, Л. М. МАТВИЕНКО, А. В. ДОРОЖИНСКАЯ,
д. т. н. В. П. МАСЛОВ, к. т. н. Г. В. ДОРОЖИНСКИЙ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА МОТОРНОГО МАСЛА

Экспериментально показано наличие корреляционных зависимостей между типом моторного масла и его рефрактометрическими и электрофизическими характеристиками (коэффициентом преломления, удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью). Предложены способы определения типа моторного масла, основанные на измерении указанных характеристик, а также прототипы портативных измерительных устройств, реализующие эти способы. Показано, что точность идентификации типа моторного масла значительно увеличивается при одновременном учете указанных физических характеристик.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, поверхностный плазмонный резонанс, моторное масло, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, коэффициент преломления.

Моторное масло (ММ) является одним из основных функциональных элементов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), определяющим его непосредственную работу, износ деталей и срок эксплуатации. Это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к качеству и соответствию ММ заявленным производителем эксплуатационным характеристикам, оперативный контроль которых позволяет наиболее эффективно проводить эксплуатацию ДВС. Основными критериями качества выпускаемого ММ являются значения его кинематической вязкости, соответствующие работе ДВС в различных температурных режимах: при запуске и в режиме прогретого двигателя. Выделяют минеральные, полусинтетические и синтетические масла с соответствующей классификацией кинематической вязкости по SAE (Society of Automotive Engineers): 15W-40, 10W-40 и 5W-30.

Стандартные вискозиметрические методы контроля кинематической вязкости (ISO 3104-94 и др.) не удовлетворяют критериям проведения экспрессного анализа, поскольку трудно поддаются автоматизации, требуют значительных объемов проб, затратны по времени и используют габаритное оборудование. Экспрессные методы контроля ММ связаны, как правило, с нахождением корреляционных зависимостей между интересующей эксплуатационной характеристикой и некоторым физическим параметром, который можно оперативно измерить. Для оперативного определения кинематической вязкости (типа) моторного масла нами предлагается использо-

вать два электрофизических параметра — удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость, и один оптический — коэффициент преломления. Предположение о существовании корреляционной зависимости между кинематической вязкостью ММ и его удельным сопротивлением следует из общих физических соображений: чем больше вязкость жидкости, тем больше затруднено движение находящихся в ней носителей заряда. Наличие же корреляции между вязкостью и диэлектрической проницаемостью, а также коэффициентом преломления ММ обусловлено различиями химического состава рассматриваемых типов ММ — высокомолекулярные насыщенные циклические и ароматические углеводороды в составе минеральных ММ [1], полиолефины и полиэфирфосфорной и кремневой кислот в составе синтетических ММ [2] и их смесь как основа полусинтетического ММ.

Целью данной работы являлась практическая реализация высокоинформативного комплексного метода определения типа ММ, основанного на измерении указанных характеристик, с изготовлением и апробацией соответствующих портативных измерительных устройств.

Особенности измерения электрофизических характеристик моторных масел

По своим электрическим свойствам моторные масла относятся к классу жидких диэлектриков. В соответствии с рекомендациями международной электротехнической комиссии (ИЕС) измерения электрофизических характеристик элек-

троизоляционных жидкостей (в том числе моторных масел) производится по методикам, описанным в [1, 2].

В [3] предлагается определение диэлектрической проницаемости ϵ и удельного сопротивления ρ по результатам измерений электрической емкости C и сопротивления R конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой жидкостью. Недостатком этого способа является использование постоянного внешнего напряжения, прикладываемого к электродам ячейки, поскольку в данном случае приэлектродные эффекты на границе раздела «электрод — жидкость» достаточно сильно искажают результаты измерений удельного сопротивления исследуемого раствора (погрешность измерений может достигать 100%).

В [4] емкостной ток и ток проводимости измеряются при приложении к исследуемому образцу переменного напряжения трапецеидальной формы, что существенно снижает влияние приэлектродных эффектов. Емкостной ток определяют во время роста/спада напряжения, а ток проводимости — в период стабильности напряжения. Подобное временное разделение составляющих полного тока упрощает процедуру измерения емкости и сопротивления электрохимической ячейки и соответствующих им значений диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления. Недостатком данного способа, как и предыдущего, является принципиальная невозможность полного исключения влияния приэлектродных процессов на результаты измерений, поскольку величина R определяется на интервалах с постоянным значением внешнего напряжения, т. е. в квазистационарном режиме. При этом погрешность измерения величины R , по нашим данным, может составлять до 10–15%.

Для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления мы предлагаем использовать синусоидальный переменный ток, что в полной мере исключает влияние приэлектродных эффектов на процесс переноса заряда через ячейку благодаря отсутствию временных участков с постоянным значением напряжения на ней. В этом случае протекающий электрический ток имеет активную и реактивную составляющие, поэтому для определения величин R и C необходимо измерить полное сопротивление (импеданс) используемой конденсаторной электрохимической ячейки.

В предположении двухэлементной эквивалентной схемы такой ячейки, заполненной образцом ММ [5], для активной (Re) и реактив-

ной (Im) составляющих импеданса можно записать следующие выражения:

$$Re = \frac{R}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}; \quad (1)$$

$$Im = \frac{2\pi C R^2 \nu}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}, \quad (2)$$

где ν — частота переменного тока.

Измерив Re и Im , из системы уравнений (1) и (2) можно определить искомые значения R и C , а зная площадь электродов S и расстояние d между ними, найти электрофизические параметры диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления исследуемой пробы:

$$\epsilon = \frac{d}{S} \frac{C}{\epsilon_0}; \quad \rho = \frac{S}{d} \quad (3)$$

$$\rho = R \frac{S}{d}, \quad (4)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Измерительная схема, реализующая предложенный способ определения электрофизических характеристик ММ

Измерение импеданса ММ проводилось по схеме, показанной на **рис. 1**. Генератор Γ подает на делитель напряжения (состоящий из конденсаторной ячейки Z , заполненной исследуемым ММ, и сопротивления нагрузки R_H) входное синусоидальное напряжение фиксированной частоты.

Входное и выходное напряжения делителя синхронно оцифровываются двухканальным аналого-цифровым преобразователем (**АЦП**) и поступают на вход устройства математической обработки (**УМО**) входного и выходного сигналов, где определяются их амплитуды A , B и фазовый сдвиг $\Delta\phi$. Входное и выходное напряжения связаны соотношением

$$U_{in} = \frac{U_{out}}{Z + R_H} Z,$$

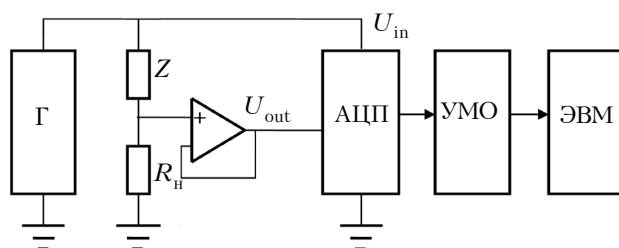


Рис. 1. Блок-схема портативного измерителя импеданса

где U_{in} , U_{out} — комплексные значения входного и выходного напряжения делителя,
 $U_{in}=A \cdot \exp(j\omega t)$,
 $U_{out}=B \cdot \exp(j(\omega t + \Delta\varphi))$.

Z — полное сопротивление (импеданс) ячейки.

Отсюда получаем выражение

$$Z = \frac{R_n}{\frac{A}{B} \exp(j\Delta\varphi) - 1}, \quad (4)$$

куда входят значения A , B , определенные устройством математической обработки, и сдвиг фаз $\Delta\varphi$ на фиксированной частоте измерений.

Отметим, что для предотвращения шунтирующего влияния входных каскадов АЦП на результаты измерений импеданса высокоомной конденсаторной ячейки оцифровка выходного напряжения делителя проводится после повторителя напряжения на основе прецизионного операционного усилителя со сверхнизким входным током (ОРА129). Также для уменьшения влияния на результаты измерений «эфирных» помех выполнено экранирование всей измерительной схемы. Для определения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости образцов ММ был использован портативный измеритель импеданса [6], изготовленный в ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины в соответствии с приведенной выше блок-схемой.

На рис. 2 представлены типовые экспериментальные частотные зависимости составляющих импеданса цилиндрической конденсаторной ячейки, заполненной образцом ММ, и аппроксимирующие их кривые, соответствующие модельным выражениям (1) и (2) для двухэлементной эквивалентной схемы ячейки. Расчетные значения параметров: удельное сопротивление 26,53 ГОм·см, диэлектрическая постоянная 2,38.

Как видно из рис. 2, оптимальным для измерений импеданса является частотный интервал 10—100 Гц, и при определении электрофизических характеристик ММ достаточно проводить измерения на одной фиксированной частоте из этого диапазона. В свою очередь, практически полное совпадение экспериментальных и модельных кривых (величина среднеквадратического отклонения в оптимальном частотном диапазоне не превышает 0,7%) свидетельствует об отсутствии влияния приэлектродных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В противном случае в эквивалентной схеме ячейки кроме параметров R и C присутствовали бы и другие компоненты (емкость двойного зарядового слоя, сопротивление переносу заряда, диффу-

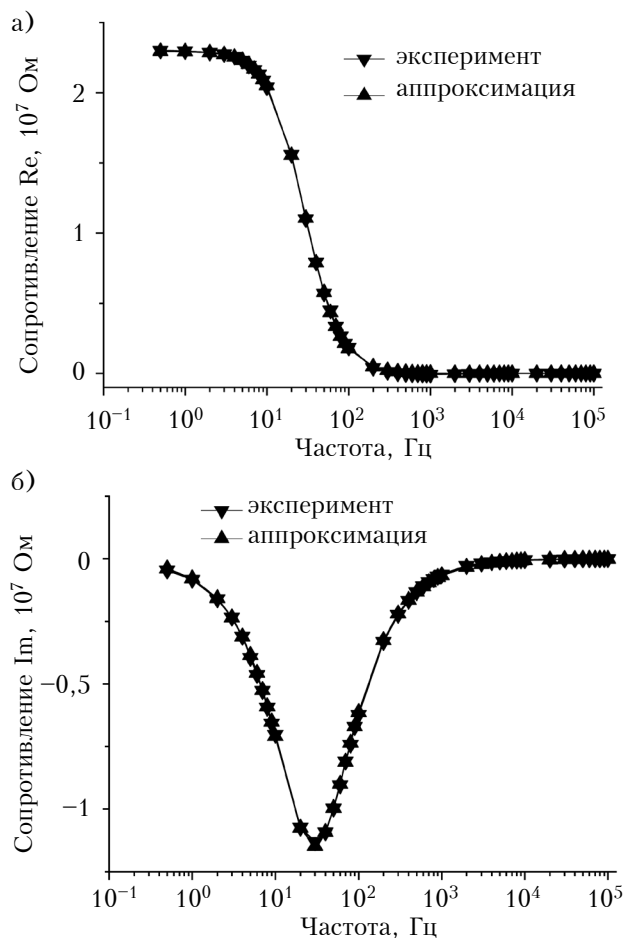


Рис. 2. Типовые экспериментальные частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих импеданса цилиндрической конденсаторной ячейки, заполненной образцом ММ Akvilon CLASSIC 15W-40

зионный импеданс), а аппроксимация экспериментальных данных выражениями (1), (2) не была бы столь точной.

Определение характеристик ММ оптическим методом

Основными и наиболее распространенными оптическими методами диагностики качества моторного масла является фотометрия [7], флуоресцентный анализ [8], инфракрасная Фурье-спектроскопия [9, 10] и атомно-абсорбционная спектрометрия [11]. Однако ни один из них не может быть использован для проведения экспрессного анализа ММ, поскольку либо не обладает достаточной точностью измерений (фотометрия), либо требует сложного и дорогостоящего оборудования. Альтернативным методом диагностики ММ является метод, основанный на эффекте поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [12]. Приборы, использующие в своей работе явление ППР, чувствительны к малым концентрациям исследуемых веществ (0,01—2 нг/мл) [13, 14] и характеризуются высокой точностью измерений [15].

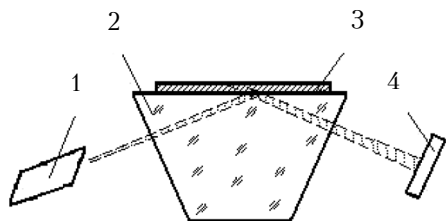


Рис. 3. Оптическая схема в геометрии Кречмана [16]:
1 — лазер; 2 — призма; 3 — металлическая пленка;
4 — фотоприемник

Для наблюдения явления ППР используют оптическую схему Кречмана: поверхностные плазмоны возбуждаются в тонкой металлической пленке, нанесенной на рабочую грань призмы полного внутреннего отражения и контактирующей с исследуемым веществом, монохроматическим p -поляризованным светом лазера определенной длины волны (рис. 3). Феномен ППР проявляется в том, что при углах падения луча θ , больших критического, в металлической пленке под действием лазерного излучения возбуждаются плазмон-поляритонные колебания электронов проводимости, при этом резко уменьшается интенсивность отраженного света (коэффициента отражения), измеренная фотоприемником при определенном резонансном угле падения θ (рис. 4). Величина резонансного угла зависит от высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ вещества на поверхности металлической пленки (а также показателя его преломления n , поскольку $\epsilon = n^2$). Увеличение показателя преломления приводит к соответствующему сдвигу резонансного угла на величину $\Delta\theta$ в сторону больших углов падения (см. рис. 4), а его уменьшение — в сторону меньших углов.

В процессе хранения и эксплуатации моторного масла вследствие окисления при контакте с агрессивными и высокотемпературными средами растет его оптическая плотность и показатель преломления [17]. В [18] впервые была

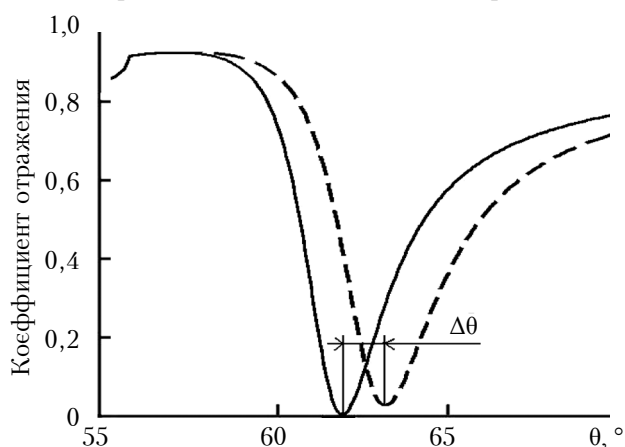


Рис. 4. Рефрактометрическая характеристика ППР до (сплошная линия) и после (штриховая линия) изменения показателя преломления (диэлектрической проницаемости) исследуемого вещества

показана возможность диагностики моторного масла с помощью метода ППР. Это позволило определить не только уровень деградации масла, но и наличие частиц, образовавшихся в результате износа, а также их объемную концентрацию. Можно предположить, что поскольку ММ разных типов имеют разный состав, значения их высокочастотной диэлектрической проницаемости также будут различаться, что позволит по ее величине провести их идентификацию.

Рефрактометрические характеристики и значения резонансного угла для образцов моторных масел измеряли с помощью портативного ППР-рефрактометра «Плазмон-71» [19], разработанного в ИФП. Перед определением $\theta_{\min}$ выполняли аппроксимацию характеристики отражения $R(\theta)$ полиномом 2-й степени в окрестности измеренного минимума [20], что позволяло повысить разрешающую угловую способность определения минимума с $75''$ до $6''$. Абсолютная погрешность измерения резонансного угла составляла $\pm 24''$, что соответствует абсолютной погрешности показателя преломления $\pm 0,00008$. Измеренные рефрактометрические характеристики ППР двух типов ММ (в виде зависимости напряжения на выходе фотоприемника U от угла θ падения света на границе «стекло — металл») приведены на рис. 5.

Для построения рефрактометрической характеристики ППР и определения резонансного угла исследуемые образцы ММ по очереди прокачивались шприцевым автоматизированным насосом через измерительную ячейку ППР-рефрактометра, которая обеспечивала их контакт с поверхностью металлической пленки чувствительного элемента. Рефрактометр, насос и резервуары с образцами ММ размещались в термостате при температуре 20°C для уменьшения температурной погрешности результатов измерений [21].

Значение показателя преломления для образца ММ было рассчитано путем численно-

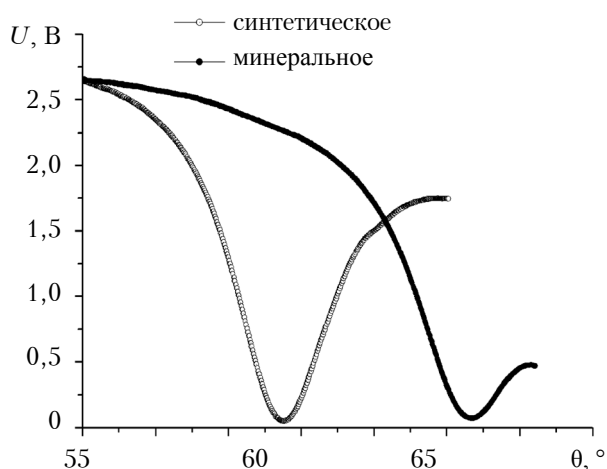


Рис. 5. Рефрактометрические характеристики ППР двух типов моторных масел: синтетического Castrol Magnatec и минерального Akvilon Classic

го моделирования соответствующих рефрактометрических характеристик с использованием измеренного значения $\theta_{\min}$, показателя преломления стеклянной призмы $n = 1,59994$, длины волны $\lambda = 850$ нм и определенных подгонкой оптических констант золотой пленки толщиной $d = 48 \pm 3$ нм чувствительного элемента ППР-сенсора (программа WinSpall 3.0). Численное моделирование выполняли, применяя формулы Френеля и математический формализм матриц рассеяния Джонса [22]. Значения показателя преломления исследуемых проб ММ лежали в диапазоне от 1,46 до 1,48.

Обсуждение полученных результатов

С использованием описанной методики получения электрических и оптических характеристик ММ и указанных измерительных устройств

был получен массив значений диэлектрической постоянной, удельного сопротивления и коэффициента преломления для 28 образцов ММ разных типов (см. **таблицу** и **рис. 6**).

Из анализа данных на рис. 6 видно, что идентификация типа ММ возможна путем измерения удельного сопротивления или коэффициента преломления. Причем по рефрактометрическому измерению уверенно идентифицируются все 14 исследованных образцов синтетических ММ (см. рис. 6, *в*). Также можно говорить о тенденции увеличения удельного сопротивления при переходе от синтетических ММ к маслам на минеральной основе (рис. 6, *а*). В то же время, не просматривается заметной корреляции типа ММ с величиной диэлектрической проницаемости (рис. 6, *б*). Анализируя рис. 6, *в*, мож-

Электрические и оптические параметры образцов ММ разных типов

№ пробы (условное обозначение)	Тип моторного масла / торговая марка	Диэлектрическая проницаемость	Удельное сопротивление, ГОм см	Коэффициент преломления
Минеральные масла				
1 (м1)	Bars, 15W-40	2,36	11,6	1,48501
2 (м2)	Минеральное 15W-40	2,33	21,1	1,48653
3 (м3)	Люкс 15W-40	2,36	40,8	1,48850
4 (м4)	Akvilon Classic 15W-40	2,38	26,53	1,48854
5 (м5)	Yuko 15W-40	2,31	8,06	1,48651
6 (м6)	Grom-Ex 15W-40	2,34	8,02	1,48350
Полусинтетические масла				
7 (п-с1)	Ярнефть, 10W-40	2,31	32,1	1,48250
8 (п-с2)	Shell Helix HX7 10W-40	2,27	15,17	1,46900
9 (п-с3)	ЛЕОЛ long life SL-CF Лидер 10W-40	2,32	12,68	1,47953
10 (п-с4)	Akvilon extra 10W-40	2,30	41,80	1,48451
11 (п-с5)	Liqui Molly 10W-40	2,29	8,85	1,47202
12 (п-с6)	Mobil Ultra 10W-40	2,37	6,79	1,47804
13 (п-с7)	ZIC X5 10W-40	2,25	15,8	1,47100
14 (п-с8)	XADO 10W-30	2,32	5,57	1,47201
Синтетические масла				
15 (с1)	Mobil Super 3000 5W-30	2,32	3,84	1,46603
16 (с2)	Toyota genuine 5W-30	2,27	6,70	1,46651
17 (с3)		2,28	6,35	1,46658
18 (с4)		2,41	3,52	1,46653
19 (с5)	HUNDAI super extra 5W-30	2,37	7,10	1,46600
20 (с6)	ELF 900 NF 5W-40	2,34	4,75	1,46708
21 (с7)	Mobil Super 3000 X1 5W-40	2,28	8,15	1,46523
22 (с8)	ELF 900 SXR evolution 5W-40	2,45	2,12	1,46550
23 (с9)	Motul 8100 X-cess 5W-40	2,31	5,99	1,46450
24 (с10)	Castrol Magnatec A3/B4 5W-40	2,35	3,34	1,46507
25 (с11)	Aral Hight Tronic 5W-40	2,47	1,92	1,46553
26 (с12)	Castrol Edge 5W-40	2,36	7,83	1,46521
27 (с13)	Mobil Super (new) 3000 5W-40	2,38	3,35	1,46526
28 (с14)	Motul 8100 x-cess NEW 5W-40	2,39	5,42	1,46655

но заметить, что изменение коэффициента преломления при переходе от синтетических масел к минеральным происходит достаточно плавно через область полусинтетических масел. В связи с этим могут возникать затруднения в идентификации образцов, у которых значения коэффициента преломления лежат в переходной области. Этот недостаток отчасти можно устрани-

нить путем использования одновременно двух характеристик — оптической и электрической.

Как видно из **рис. 7**, область расположения точек, соответствующих синтетическим маслам, четко ограничена и удалена от всех других образцов, что позволяет уверенно и однозначно идентифицировать этот тип масел. При этом области точек для образцов масел с минеральной составляющей — полусинтетических и минеральных — примыкают друг к другу по оси абсцисс, различаясь главным образом величиной коэффициента преломления.

Отметим, что представленный на **рис. 7** способ идентификации типа ММ не является оптимальным с точки зрения «экспрессности» анализа, поскольку требует проведения одновременно оптических и электрических измерений, однако этот недостаток компенсируется высокой распознавательной способностью. Заметим также, что, учитывая известное электродинамическое соотношение $n \approx \sqrt{\epsilon}$ между коэффициентом преломления n и квазистатической диэлектрической проницаемостью среды ϵ , можно было бы ожидать корреляционной зависимости между типом ММ и его диэлектрической проницаемостью, подобно изображенной на **рис. 6, в**, однако этого обнаружено не было (см. **рис. 6, б**). Причиной отсутствия указанной корреляции могло быть наличие различной дисперсии относительной диэлектрической проницаемости образцов ММ, поскольку определение выполнялось в существенно различающихся спектральных диапазонах — герцевом (методом импедансметрии) и терагерцевом (методом ППР). Кроме того, погрешность измерения диэлектрической проницаемости образцов ММ составляла до 3%, в отличие от очень малой погрешности определения коэффициента преломления, характерной для оптических измерений (0,006% в нашем случае). Можно предположить, что в случае уменьшения погрешности измерения электрофизических характеристик ММ при использовании более точных мостовых схем измерения импеданса корреляция между

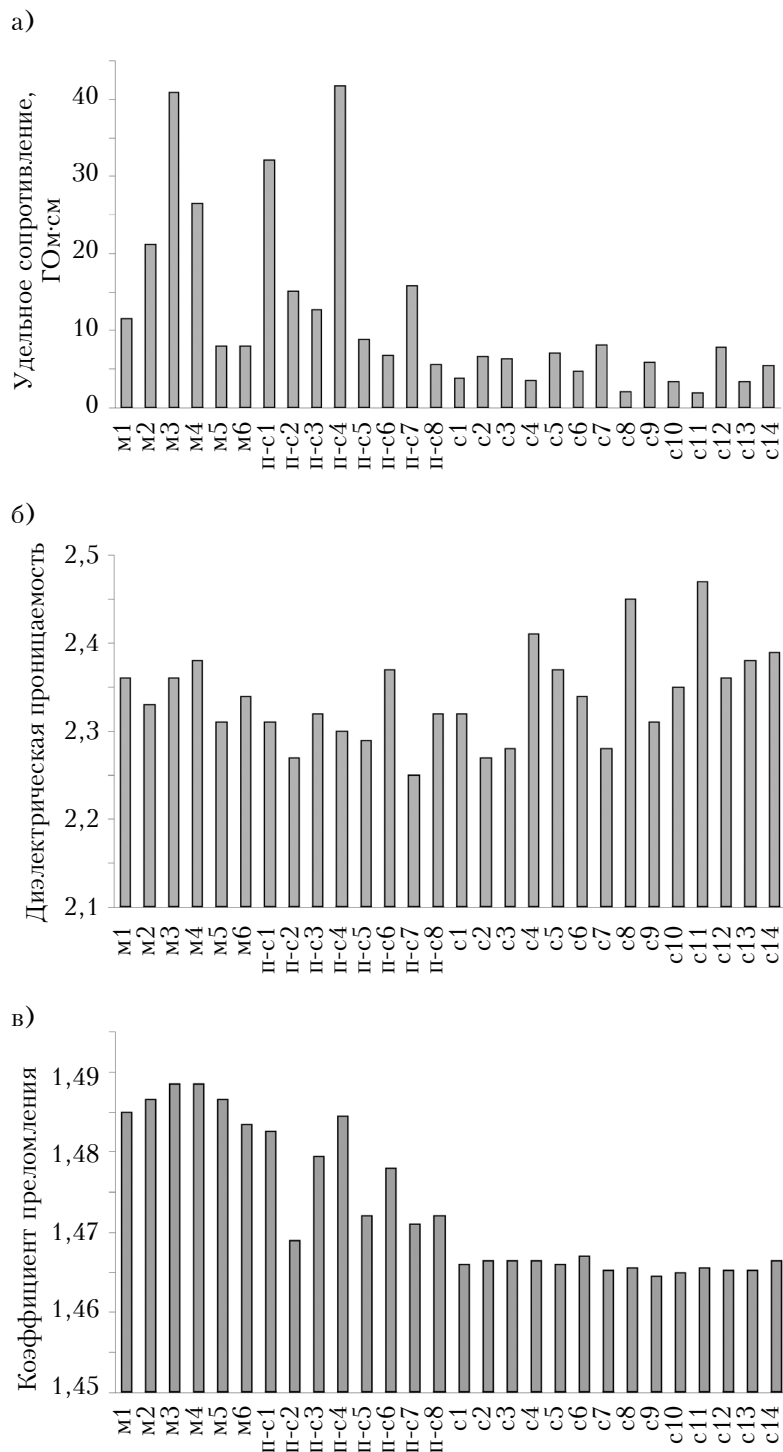


Рис. 6. Диаграммы значений удельного сопротивления (а), диэлектрической проницаемости (б) и коэффициента преломления (в) образцов моторных масел различных типов

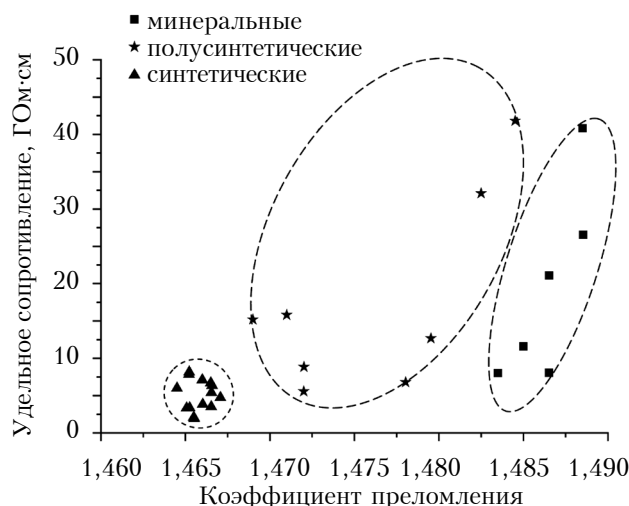


Рис. 7. Распределение исследуемых образцов моторных масел в декартовых координатах коэффициента преломления и удельного сопротивления

типом ММ и его диэлектрической проницаемостью может быть выявлена [23].

Выводы

Таким образом, показана возможность идентификации типа моторного масла (минеральное, полусинтетическое, синтетическое) путем комплексных измерений его рефрактометрической и электрофизической характеристик (коэффициента преломления и удельного сопротивления) благодаря наличию определенных корреляционных зависимостей между типом ММ и обоими указанными физическими параметрами. При этом наиболее точно этим методом можно выявить чисто синтетические моторные масла и масла с минеральной составляющей (полусинтетические и минеральные). Результаты исследования могут быть использованы как для идентификации типа моторного масла, так и для выявления фальсификата.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity.
2. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
3. Черножуков Н.И., Крейн С.Э., Лосиков Б.В. Химия минеральных масел. — ГосТопТехИздат, 1951.
4. Мамедьяров М.А. Химия синтетических масел. — Ленинград: Химия, 1989.
5. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С. и др. Использование метода импедансной спектроскопии для анализа бензольного топлива // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2–3. — С. 61–67. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.2-3.61>
6. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Павлюченко А.С. Экспресс анализатор параметров функциональных материалов на основе метода импедансной спектроскопии // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3(9). — № 3. — С. 6–15. — <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.3.114507>

7. Чакчир Б.А., Алексеева Г.М. Фотометрические методы анализа: Методические указания. — С.-Пб.: Изд-во СПХФА, 2002.
8. Забурнягин В.П., Яровой П.Н. Применение лазерного флуоресцентного анализа для идентификации нефтепродуктов // Журнал прикладной спектроскопии. — 1988. — Т. 48, № 5. — С. 819–822.
9. Powell J.R., Toms A.M. Molecular Analysis of Lubricants by FTIR Spectroscopy // P/PM Technology. — 1997. — vol. 10, N 4. — P. 58–64.
10. Bley T., Pignatelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation // Journal of Sensors and Sensor Systems. — 2014. — Vol. 3. — P. 121–132. — <https://doi.org/10.5194/jsss-3-121-2014>
11. Мышкин Н.К., Холодилов О.В., Маркова Л.В., Семенюк М.С. Диагностика изнашивания смазанных подвижных сопряжений // Трение и износ. — 1986. — Т. 7, № 6. — С. 1091–1101.
12. Milanese M., Ricciardi A., Manerab M.G. et al. Real time oil control by surface plasmon resonance transduction methodology // Sensors and Actuators A. — 2015. — Vol. 223. — P. 97–104. — <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.008>
13. Shalabney A., Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors // Laser Photonics Rev. — 2011. — Vol. 5, N 4. — P. 571–606. — <https://doi.org/10.1002/lpor.201000009>
14. Войтович И.Д., Корсунский В. М. Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения. — Киев: Сталь, 2011.
15. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water suspensions // Functional Materials Journal (FMJ). — 2018. — Vol. 25, iss. 1. — P. 158–164. — <https://doi.org/10.15407/fm25.01.158>
16. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light // Naturforschung. — 1968. — Vol. 123. — P. 2135–2136. — <https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247>
17. Liptuga A.I., Dorozinsky G. V., Gordienko V.I. et al. Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon // Scholars Journal of Engineering and Technology. — 2015. — Vol. 3. — P. 372–374.
18. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Khrystosenko R.V. et al. Surface plasmon resonance – a promising method for estimating the quality of motor oil // Trans & Motauto World Journal. — 2017. — Vol. 1. — P. 41–44.
19. Dorozinska H., Dorozinsky G., Maslov V., Kachur N. The use surface plasmon resonance to determine the optical parameters of UV-adhesive and control polymerization process // American Journal of Materials Science and Application. — 2019. — Vol. 7, N 1. — P. 25–29. — <https://doi.org/10.15406/msej.2019.03.00090>
20. Ширшов Ю. М., Самойлов А. В., Христиненко Р. В. и др. Анализ и численное моделирование ППР-спектрометров с механической разворткой по углу: алгоритм определения угловой позиции минимума // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2004. — Т. 6, № 3. — С. 3–18.
21. Dorozinska H.V., Turu T.A., Markina O.M. et al. Influence of temperature on the measuring accuracy of devices based on surface plasmon resonance phenomenon // Modern Instrumentation. — 2018. — Vol. 7. — P. 1–10. <https://doi.org/10.4236/mi.2018.71001>
22. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. — Москва: Мир, 1981.
23. Григоров А.Б., Наглюк И.С. Диэлектрические свойства моторных масел // Автомобильный транспорт. — Харьков: Харьк. нац. автом.-дорож. ун-т., 2009. — № 25. — С. 167–170.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.04 2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.36
УДК 532.538; 539.21; 621.38

А. В. МАМИКІН, О. Л. КУКЛА, Л. М. МАТВИЄНКО,
Г. В. ДОРОЖИНСЬКА, В. П. МАСЛОВ,
Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

ВИСОКОІНФОРМАТИВНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ МОТОРНОГО МАСТИЛА

Експериментально показано наявність кореляційних залежностей між типом моторного мастила та його рефрактометричними і електрофізичними характеристиками (коефіцієнтом заломлення, питомим опором і діелектричною проникністю). Запропоновано способи визначення типу моторного мастила, засновані на вимірюванні зазначених характеристик, а також прототипи портативних вимірювальних пристроїв, що реалізують ці способи. Для визначення питомого опору та діелектричної проникності використано метод імпедансної спектроскопії, а для визначення коефіцієнта заломлення застосовано пристрій на основі ефекту поверхневого плазмонного резонансу. Показано, що точність ідентифікації типу моторного мастила значно збільшується, якщо одночасно враховувати вказані фізичні характеристики. Показано, що зазначеним комплексним методом найбільш точно можна виявити, з одного боку, чисто синтетичні моторні мастила, а з іншого — мастила з мінеральною складовою (напівсинтетичні та мінеральні). Результати досліджень можуть бути використані як для ідентифікації типу моторного мастила, так і для виявлення фальсифікату.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, поверхневий плазмонний резонанс, моторне мастило, питомий опір, діелектрична проникність, коефіцієнт заломлення.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.36
UDC 532.538; 539.21; 621.38

A. V. MAMYKIN, A. L. KUKLA, L. M. MATVIENKO,
H. V. DOROZINSKA, V. P. MASLOV, G. V. DOROZINSKY

Ukraine, Kyiv,
V. E. Lashkaryov Institute of
Semiconductor Physics of NAS of Ukraine
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

HIGHLY INFORMATIVE INTEGRATED METHOD FOR DETERMINING THE TYPE OF ENGINE OIL

The presence of correlation dependences between the type of motor oil and its refractometric and electrophysical characteristics (refractive index, specific resistance and dielectric constant) is experimentally shown. Methods for determining the type of engine oil are proposed, based on the measurement of these characteristics, as well as prototypes of portable measuring devices that implement these methods. Impedance spectroscopy was used to determine the resistivity and dielectric constant, and a device based on the effect of surface plasmon resonance was used to determine the refractive index. It is shown that the accuracy of identification of the type of motor oil increases significantly with simultaneous consideration of all above physical characteristics. It is shown that this complex method can most accurately detect, on the one hand, purely synthetic motor oils, on the other hand, oils with a mineral component (semi-synthetic and mineral). The results of the studies can be used to identify the type of motor oil as well as to detect forgery.

Keywords: impedance spectroscopy, surface plasmon resonance, engine oil, resistivity, dielectric constant, refractive index.

REFERENCES

1. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.
2. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
3. Chernozhukov N.I., Kreyn S.E., Losykov B.V. *Khimiya mineral'nykh masel* [Chemistry of mineral oils]. GosTopTekhizdat, 1951, 307 p. (Rus)
4. Mamed'yarov M.A. *Khimiya sinteticheskikh masel* [Chemistry of synthetic oils]. Leningrad, Chemistry, 1989, 240 p. (Rus)

5. Kukla O.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S. et al. [Application of impedance spectroscopy method for analysis of benzanol fuels]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniya v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 2–3, pp. 61–67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.61> (Rus)
6. Kukla O.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S., Pavluchenko A.S. [Express analyzer of functional materials parameters based on the impedance spectroscopy method]. *Sensor electronics and microsystem technologies*, 2012, vol. 3(9), iss. 3, pp. 6–15. <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.3.114507> (Rus)
7. Chakchir B.A., Alekseyeva G.M. *Fotometricheskiye metody analiza: Metodicheskkiye ukazaniya* [Photometric

methods of analysis: Guidelines]. Saint Petersburg, SPChFA, 2002. (Rus)

8. Zaburnagin V.P., Jarovoj P.N. [Application of laser fluorescence analysis for the identification of petroleum products]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1988, vol. 48, iss. 5, pp. 819–822. (Rus)

9. Powell J.R., Toms A.M. Molecular Analysis of Lubricants by FTIR Spectroscopy. *P/PM Technology*, 1997, vol. 10, no. 4, pp. 58–64.

10. Bley T., Pignatelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2014, vol. 3, pp. 121–132. <https://doi.org/10.5194/jsss-3-121-2014>

11. Myshkin N.K., Holodilov O.V., Markova L.V., Semenuk M.S. [Diagnosis of wear of lubricated mobile couplings]. *Friction and wear*, 1986, vol. 7, iss. 6, pp. 1091–1101. (Rus)

12. Milanese M., Ricciardi A., Manerab M.G. et al. Real time oil control by surface plasmon resonance transduction methodology. *Sensors and Actuators A*, 2015, vol. 223, pp. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.008>

13. Shalabney A., Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. *Laser Photonics Rev.*, 2011, vol. 5, no 4, no. 571–606.

14. Voytovich I.D., Korsunskiy V. M. *Sensory na osnove plazmonnogo rezonansa: printsipy, tekhnologii, primeneniya* [Plasmon resonance sensors: principles, technologies, applications]. Kyiv, Stal, 2011, 534 p. (Rus)

15. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water suspensions. *Functional Materials Journal (FMJ)*, 2018, vol. 25, iss. 1, pp. 158–164. <https://doi.org/10.15407/fm25.01.158>

16. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light. *Naturforschung*,

1968, vol. 123, pp. 2135–2136. <https://doi.org/10.1515/zn-1968-1247>

17. Liptuga A.I., Dorozinsky G. V., Gordienko V.I. et al. Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 3, pp. 372–374.

18. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Khrystosenko R.V. et al. Surface plasmon resonance – a promising method for estimating the quality of motor oil. *Trans & Motauto World Journal*, 2017, vol. 1, pp. 41–44.

19. Dorozinska H., Dorozinsky G., Maslov V., Kachur N. The use surface plasmon resonance to determine the optical parameters of UV-adhesive and control polymerization process. *American Journal of Materials Science and Application*, 2019, vol. 7, N 1, pp. 25–29. <https://doi.org/10.15406/msej.2019.03.00090>

20. Shirshov Yu.M., Samoylov A.V., Christosenko R.V. et al. [Analysis and numerical simulation of mechanical angle-scanning SPR spectrometers: an algorithm for determining the minimum angular position]. *Registration, storage and processing of data*, 2004, vol. 6, iss. 3, pp. 3–18. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/50686> (Rus)

21. Dorozinska H.V., Turu T.A., Markina O.M. et al. Influence of temperature on the measuring accuracy of devices based on surface plasmon resonance phenomenon. *Modern Instrumentation*, 2018, vol. 7, pp. 1–10. <https://doi.org/10.4236/mi.2018.71001>

22. Azzam R., Bashara N. *Ellipsometriya i polarizovanny svet* [Ellipsometry and polarized light]. Moscow, Mir, 1981, 583 p. (Rus)

23. Grigorov A.B., Naglyuk I.S. [Dielectric properties of motor oils]. *Automobile Transport*, Kharkov, 2009, no. 25, pp. 167–170. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Мамыкин А. В., Кукла А. Л., Матвиенко Л. М., Дорожинская Г. В., Маслов В. П., Дорожинский Г. В. Высокоинформативный комплексный метод определения типа моторного масла. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 3-4, с. 36–44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.36>

Cite the article as:

Mamykin A. V., Kukla A. L., Matvienko L. M., Dorozinska H. V., Maslov V. P., Dorozinsky G. V. Highly informative integrated method for determining the type of engine oil. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 36-44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.36>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Борковська Людмила Володимирівна, канд. фіз.-мат. наук, зав. лабораторії, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ

Глушеченко Едуард Миколайович, канд. техн. наук, начальник відділку, НПП «Сатурн», м. Київ

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Курак Владислав Володимирович, канд. техн. наук, доцент, Херсонський національний технічний університет

Плаксин Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділом, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, м. Дніпро

Сафронов Павло Сергієвич, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет