

А. В. МАМЫКИН, д. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, А. С. МАЙСТРЕНКО,
к. ф.-м. н. Е. П. МАЦАС, Л. М. МАТВИЕНКО

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

СПОСОБ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОИМПЕДАНСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ И МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Предложен способ определения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей на примере бензина разных марок, основанный на спектроимпедансных измерениях конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой жидкостью. Приложение синусоидального тестирующего напряжения в области частот 0,1 – 10 Гц обеспечивает большую точность измерений в сравнении с известными традиционными методами. Разработан и сконструирован портативный измеритель полного электрического сопротивления (импеданса) диэлектрических жидкостей. Предложен и протестирован подход для экспрессной оценки октанового числа автомобильных бензинов с помощью спектроимпедансных измерений при использовании статистических методов анализа многомерных данных.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, автомобильный бензин, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, статистический анализ.

Наиболее важной эксплуатационной характеристикой автомобильного бензина является его детонационная стойкость (способность топлива противостоять самовоспламенению при сжатии), показателем которой является его октановое число. Интерес к оперативному измерению октанового числа, возникший с началом массового производства двигателей внутреннего сгорания, актуален по сей день и связан с постоянно растущими требованиями к качеству бензинового топлива, с одной стороны, и большим количеством предлагаемых на рынке марок бензина от разных производителей, с другой.

Традиционно для измерения октанового числа используют стационарную моторную установку, представляющую собой одноцилиндровый карбюраторный двигатель, применение которого в полевых условиях затруднено. Поэтому значительный интерес представляет разработка альтернативных, безмоторных методов определения детонационной стойкости, суть которых сводится к нахождению взаимной корреляции между октановым числом и каким-либо физико-химическим параметром топлива, который можно измерить оперативно.

Наиболее распространенный в настоящее время безмоторный метод определения октанового числа на практике основан на измерении диэлектрической проницаемости пробы бензина. При исследовании бензина, не содержащего антидетонационные присадки, действительно, наблюдается устойчивая корреляция между его дето-

национной стойкостью и диэлектрической проницаемостью ϵ [1]. Применяемые при производстве такого бензина процессы каталитического риформинга и крекинга способствуют дополнительной изомеризации и ароматизации компонентов нефтяных фракций. При этом фактически происходит насыщение топлива разветвленными (изооктан, изопентан и др.) и ароматическими (бензол, толуол и др.) соединениями, детонационная стойкость и диэлектрическая проницаемость которых несколько выше, чем у остальных компонентов бензина (линейные алканы, циклоалканы и др.). В случае же применения в составе бензина антидетонационных присадок, наиболее перспективными из которых на сегодняшний день являются кислородосодержащие углеводородные соединения, корреляция между интересующими нас параметрами в общем случае исчезает. Это связано с тем, что такие бензиновые присадки (метилбутиловый эфир и др.) имеют намного большую величину диэлектрической проницаемости, чем традиционные высокооктановые компоненты автомобильного бензина ($\epsilon = 2,27$ для бензола, $\epsilon = 2,37$ для толуола, $\epsilon = 27$ для этанола). То есть итоговая диэлектрическая проницаемость конкретной марки товарного бензина зависит от наличия/отсутствия в нем антидетонационных присадок, что при проведении экспрессного анализа топлива не всегда известно. Заметим, что на сегодняшний день в продаже имеется ряд диэлектрометрических октано-

метров (марок “Асмер”, “SHATOX SX-100M”, экспресс-анализатор “ИТ-5” и др.), но для их корректной работы необходима информация о происхождении и составе конкретной пробы бензина. В результате калибровка подобных приборов должна проводиться на бензине заранее известного производителя, что в свою очередь накладывает ограничения на универсальность описанной методики.

Диэлектromетрический способ определения октанового числа автомобильного бензина получил существенное развитие в работе [2]. Авторами предложен способ классификации марок товарного бензина путем анализа величины диэлектрической проницаемости исходного образца топлива и трех его фракций, получаемых при фракционной перегонке (первая фракция — от начала кипения до 75°C, вторая — от 75 до 120°C, третья — от 120 до 190°C). При этом, применяемая при обработке экспериментальных данных процедура статистического анализа (кластерный анализ) позволила с высокой точностью определять марку исследуемого образца товарного бензина. В то же время, оперативность предложенной методики невелика, поскольку процесс фракционной перегонки образцов бензина в полевых условиях связан с существенными временными и техническими ограничениями.

Целью данной работы было исследование возможности экспрессного определения октанового числа на основе анализа результатов измерений нескольких физико-химических параметров пробы бензина, каждый из которых в общем случае может не иметь явной корреляционной связи с искомой величиной. При этом должны учитываться критерии проведения экспрессного анализа — небольшое время измерений, простота и дешевизна используемого оборудования, минимальное количество манипуляций с исследуемой пробой топлива, возможность автоматизации.

К основным задачам работы относится выбор достаточно информативных анализируемых параметров бензина, отработка методики и оптимального протокола измерений. Необходимо также подобрать оптимальный метод статистической обработки данных, позволяющий осуществить классификацию образцов бензина по величине октанового числа.

Выбор измеряемых физико-химических параметров

При выборе измеряемых физико-химических параметров бензиновой пробы целесообразно ориентироваться на те, что традиционно используются при разработке безмоторных способов определения октанового числа автомобильного бензина (табл. 1). Анализ физических методов, используемых для этой цели, приведен в [3]. Отметим, что применимость хроматографических и спектроскопических методов измерения весьма ограничена необходимостью использования сложного и дорогостоящего оборудования. Использование оптических методов ограничено достаточно высокими требованиями к условиям эксплуатации, характерным для всех оптических систем. Наибольшую популярность при проведении экспресс-анализа получили электрофизические методы. В этом случае, как правило, реализуется упомянутый диэлектromетрический способ определения октанового числа, а для измерений используется конденсаторная электрохимическая ячейка, заполненная исследуемым топливом. Такая ячейка легко монтируется в систему подачи топлива, неприхотлива к условиям эксплуатации, а измерение ее электрической емкости осуществляется при помощи простых электронных схем (метод вольтметра-амперметра, резонансный метод и т. д.).

Отмеченная выше неоднозначность в корреляции октанового числа бензина с его диэлектрической проницаемостью привела нас к необходимо-

Таблица 1

Параметры, определяемые при применении основных безмоторных методов нахождения октанового числа бензина

Методы	Определяемые параметры
Электромагнитные	Диэлектрическая проницаемость, индуктивность, добротность, тангенс угла диэлектрических потерь, проводимость
Оптические	Показатель преломления, оптическая плотность
Хроматографические	Октановое число смеси, которое рассчитывается по значениям концентрации отдельных химических веществ
Общезфизические	Плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, скорость и затухание ультразвуковой волны.
Спектроскопические	Поглощение в УФ- и ближней ИК-области на характеристической длине волны

сти анализа дополнительного параметра топлива — удельного электрического сопротивления. По его величине можно сделать заключение, в частности, о наличии и количестве в исследуемом бензине электропроводящих антидетонационных присадок, наиболее перспективной из которых на сегодняшний день является этиловый спирт. Как правило, измерение удельного сопротивления проводят на постоянном электрическом токе с использованием конденсаторной электрохимической ячейки [4].

Еще одной физической величиной, которую мы используем для проведения экспресс-анализа топлива, является его удельная плотность. Несмотря на то, что четкой корреляции между октановым числом и удельной плотностью также не наблюдается [3], тем не менее, ее значения для высокооктановых сортов бензина в целом больше, чем для низкооктановых [5]. Кроме того, удельная плотность является едва ли не единственной фундаментальной физической величиной в показателях качества автомобильного бензина, и для ее измерения уже давно разработаны экспрессные методики и приборы (вибрационный плотномер “D625”, плотномер 804). Использование этого параметра, как мы считаем, должно способствовать объективному анализу образцов топлив.

Особенности измерения электрофизических характеристик диэлектрических жидкостей

В соответствии с рекомендациями международной электротехнической комиссии (IEC) измерения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей (в том числе и нефтяного топлива) с удельным сопротивлением $10^{10} - 10^{16}$ Ом·см производятся по методикам, описанным в [6, 7]. Измерения в соответствии с методикой [6] предполагают определение диэлектрической проницаемости ϵ и удельного сопротивления ρ по результатам измерений электрической емкости C и сопротивления R заполненной исследуемой жидкостью конденсаторной электрохимической ячейки. Зная площадь электродов ячейки и расстояние между ними, можно легко рассчитать искомые значения ϵ , ρ и $\text{tg}\delta$ ($\text{tg}\delta = 1/(\epsilon\rho\omega)$, где ω — круговая частота). Недостатком данного способа является использование постоянного внешнего напряжения, которое подается на электроды электрохимической ячейки: наличие приэлектродных эффектов, которые происходят в этом случае на границе раздела «электрод — жидкость», существенно искажают результаты измерений удельного сопротивления исследуемого раствора (погрешность измерений может достигать 100%).

Измерения в [7] предполагают определение емкостного тока и тока проводимости путем прикладывания к исследуемому образцу переменного напряжения трапецеидальной формы. Емкостной ток I_c измеряют во время роста или спада напряжения, а ток проводимости I_r — при стабильном напряжении (на плоских участках трапецеидального сигнала). Если напряжение трапецеидального сигнала с амплитудой $\pm V_s$ изменяется с известным наклоном dV/dt , то искомые емкость и сопротивление можно определить из соотношений $C = \frac{I_c}{dV/dt}$, $R = V_s/I_r$.

Недостатком данного способа, как и предыдущего, является принципиальная невозможность полного исключения влияния поляризационных эффектов на результаты измерений, поскольку значение R определяется на интервалах, где внешнее напряжение постоянно, т. е. в квазистационарном режиме. При этом погрешность измерений, в частности величины R , по нашим данным, может составлять до 10—15%.

В данной работе точность измерений удельного сопротивления проб автомобильного бензина была увеличена благодаря применению доступной по своей реализации методики, исключая влияние поляризационных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В качестве тестирующего сигнала использован синусоидальный сигнал, для которого характерно отсутствие участков с постоянным напряжением. В этом случае через ячейку проходит ток, вектор которого можно разложить на активную и реактивную составляющие, поэтому для корректного определения значений R и C необходимо проводить измерение ее полного сопротивления (импеданса).

Эквивалентная схема конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой электроизоляционной жидкостью, состоит из параллельно соединенных сопротивления и емкости. В соответствии с такой схемой, для активной (Re) и реактивной (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 измерений, $\nu = \omega/(2\pi)$.

Таким образом, измерив значения Re и Im , из системы уравнений (1) и (2) можно определить значения R и C в данной эквивалентной схеме, а зная площадь электродов S и расстояние d между ними, найти искомые электрофи-

зические характеристики исследуемой жидкости по формулам

$$\varepsilon = \frac{d}{S} \frac{C}{\varepsilon_0}; \quad (3)$$

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

На практике для измерений полного электрического сопротивления используют стандартные лабораторные измерители импеданса, принцип работы которых основан, как правило, на мостовой схеме измерений. При этом нижняя граница определения тангенса угла диэлектрических потерь для таких приборов составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ при минимальной частоте измерений 25 – 50 Гц. При типовых значениях удельного сопротивления $10^{12} - 10^{13}$ Ом·см и диэлектрической проницаемости $\varepsilon \approx 2$, характерных для всех марок автомобильного бензина, значение тангенса угла диэлектрических потерь (Re/Im) составляет 0,001 – 0,01. В этом случае при использовании стандартных лабораторных LCR-метров результат измерений активной составляющей импеданса конденсаторной ячейки в области нижних частот характеризуется значительной погрешностью (рис. 1). Этот недостаток стандартных LCR-измерителей обусловлен спецификой требований к измерению импеданса диэлектрического объекта, связанных с измерением сверхмалых токов.

На основании вышесказанного, измерения импеданса таких высокоомных объектов, как бензин, предлагается производить при более низких частотах – от 0,1 до 10 Гц. В этом случае активное сопротивление измеряется значительно точнее, т. к. оно не шунтируется емкостным сопротивлением, а значение тангенса угла потерь возрастает на два-три порядка (по сравнению с из-

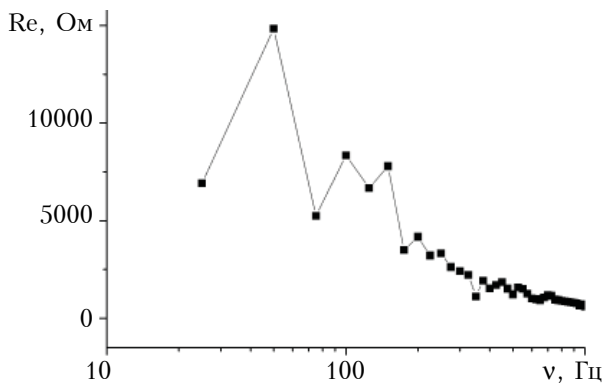


Рис. 1. Частотная зависимость активной составляющей импеданса образца бензина, полученная с использованием стандартного лабораторного измерителя импеданса E7-20

мерениями на частоте 50 Гц) и для автомобильного бензина составляет 0,1 – 1. Величины такого порядка удается измерять достаточно точно (т. е. уверенно определять активную и реактивную составляющую импеданса) даже с использованием более простых, чем мостовые, измерительных схем, что, в свою очередь, значительно упрощает разработку и изготовление портативных измерительных экспресс-анализаторов.

Экспериментальная часть

Измерения импеданса проводятся с помощью блок-схемы, показанной на рис. 2. Генератор подает на делитель напряжения (состоит из сопротивления нагрузки и конденсаторной ячейки, заполненной исследуемой бензиновой пробой) входное синусоидальное напряжение фиксированной частоты (из диапазона 0,1 – 10 Гц). Выходное напряжение снимается с измерительной ячейки. Входное и выходное напряжения синхронно оцифровываются двухканальным аналогово-цифровым преобразователем и поступают на вход устройства математической обработки, где определяются их амплитуды (соответственно, A и B) и фазовый сдвиг Δφ между ними.

Входное и выходное напряжения делителя связаны соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{Z + R_{\text{Н}}} Z, \quad (5)$$

где Z – импеданс ячейки;
 $U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}$ – комплексные значения входного и выходного напряжения, $U_{\text{ВХ}} = A \cdot \exp(j\omega t)$,
 $U_{\text{ВЫХ}} = B \cdot \exp(j(\omega t + \Delta\phi))$.

Соответственно, для расчета импеданса получаем выражение

$$Z = \frac{R_{\text{Н}}}{\frac{A}{B} \exp(-j \cdot \Delta\phi) - 1}. \quad (6)$$

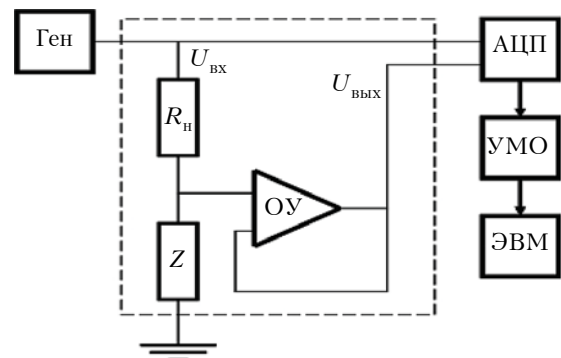


Рис. 2. Блок-схема портативного измерителя импеданса автомобильного бензина:

Ген – генератор; $R_{\text{Н}}$ – сопротивление нагрузки; Z – конденсаторная ячейка; ОУ – операционный усилитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; УМО – устройство математической обработки

Входящие сюда величины A , B и $\Delta\varphi$ определяются устройством математической обработки на фиксированной частоте измерений ϵ из диапазона 0,1 – 10 Гц.

Таким образом, получив из (6) величину полного сопротивления, можно рассчитать его активную и реактивную составляющие, затем из системы уравнений (1) и (2) определить значения R и C и далее по формулам (3), (4) посчитать соответствующие им величины удельного сопротивления ρ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ исследуемой пробы.

Для исключения шунтирующего влияния входных каскадов АЦП на результаты измерений импеданса высокоомной конденсаторной ячейки оцифровка выходного напряжения делителя происходит с помощью повторителя напряжения, построенного на основе прецизионного операционного усилителя (см. рис. 2) со сверхнизким входным током (ОРА129). Важным является также экранирование измерительной схемы с целью уменьшения влияния на результаты измерений внешних электромагнитных помех.

На рис. 3 показан действующий макет портативного устройства для измерения электрофизических характеристик автомобильного бензина. В данной реализации измерительной схемы для оцифровывания входного и выходного напряжения делителя используется стандартная двухканальная осциллографическая приставка к компьютеру с вмонтированным в нее функциональным генератором (используется для формирования синусоидального тестового сигнала). Для подобных измерений также может использоваться разработанный нами ранее вариант портативного измерителя импеданса [8, 9] при внесении в его аналоговую измерительную часть изменений в соответствии с блок-схемой на рис. 2.



Рис. 3. Портативный измеритель импеданса автомобильного бензина, оснащенный специальной электролитической ячейкой

На рис. 4 представлены частотные зависимости составляющих импеданса ячейки для двух проб автомобильного бензина АИ92, полученные экспериментально и рассчитанные из выражений (1) и (2). Здесь видно, что эти данные практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии влияния приэлектродных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В противном случае в эквивалентной схеме ячейки кроме элементов R и C присутствовали бы и другие компоненты (емкость двойного электрического слоя, сопротивление переносу, диффузионный импеданс), и точность расчетов была бы не столь высока.

Пробы для исследований (21 образец высокооктанового автомобильного бензина АИ92 и АИ95 девяти торговых марок) были приобретены на различных АЗС. Октановое число каждой пробы контролировалось в соответствии с ГОСТ 8226-82 «Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа» и в целом

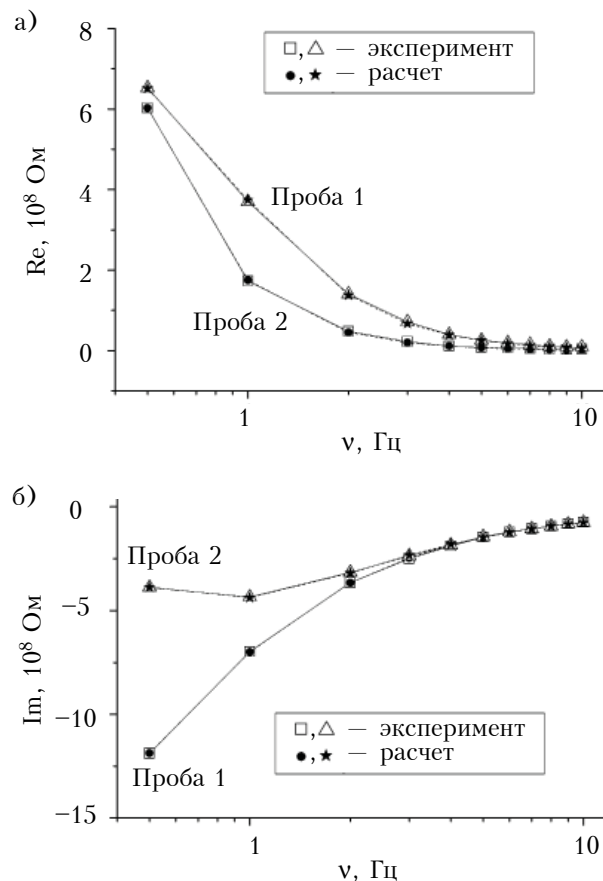


Рис. 4. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих импеданса измерительной ячейки для двух проб автомобильного бензина АИ92:

проба 1 — $\epsilon = 2,074$, $\rho = 4,14 \cdot 10^{12}$ Ом·см;
проба 2 — $\epsilon = 2,048$, $\rho = 1,007 \cdot 10^{12}$ Ом·см

Таблица 2

Значения параметров бензина различных марок и поставщиков

№ пробы	Марка бензина	Торговая марка	Удельное сопротивление, 10^{12} Ом·см	Диэлектрическая проницаемость	Плотность, кг/м ³
1	АИ95	ТНК	10,82	2,148	746
2			5,998	2,165	748
3		Shell	3,99	2,173	746
4		WOG	8,79	2,053	737
5			0,87	2,065	740
6		Mustang	0,68	2,061	735
7			0,53	2,022	745
8		ANP	2,67	2,247	747
9			7,29	2,181	738
10		Авиас	2,46	2,25	750
11		Okko	1,58	2,165	755
12		Socar	0,99	2,022	735
13			2,54	2,257	738
14		ТНК	8,22	2,046	743
15	АИ92	ANP	2,50	2,183	735
16		Socar	7,80	1,987	720
17		Авиас	1,63	2,14	743
18		Okko	4,14	2,074	745
19		BPCM	3,54	2,03	721
20			2,13	2,012	723
21		WOG	1,007	2,048	721

соответствовало заявленным производителем величинам. При помощи портативного измерителя (см. рис. 3) были определены электрофизические параметры (ρ , ϵ) всех образцов топлива. Также ареометрическим способом (ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности») была получена их плотность. Все измерения проводились в специальном термостате при температуре 20°C. Таким образом, каждая проба была охарактеризована тремя параметрами (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и плотность). Результаты этих измерений представлены в **табл. 2**.

Анализ полученных данных

Для анализа полученных многомерных данных были использованы математические методы статистического анализа, такие как кластерный анализ и метод анализа главных компонент, позволяющие провести распознавание образцов бензина с разными значениями октанового числа.

Статистическую процедуру кластеризации проводили методом k -средних [10, с. 38–40],

суть которого состоит в разделении m наблюдений на k кластеров при условии, что каждое наблюдение будет отнесено к тому кластеру, к центру которого оно находится ближе всего. В нашем случае изначально принималось $k = m = 21$, т. е. каждое наблюдение, относящееся к отдельному образцу, формировало единственный кластер. Далее происходило укрупнение кластеров, а критерием для каждого последующего этапа кластеризации была идентичность марок бензина по величине октанового числа [11]. Таким образом, 21 наблюдение из **табл. 2** было распределено на 11 неперекрывающихся кластеров, содержащих пробы бензина с одинаковым октановым числом (**табл. 3**). При дальнейшем уменьшении числа кластеров наблюдения из соседних групп начинали объединяться вследствие их взаимного сближения.

Достаточно большое число полученных единичных кластеров (шесть), скорее всего, объясняется большим разнообразием компонентного состава проб бензина [12] и, соответственно, значительным разбросом значений их параме-

Таблица 3

Кластеризация экспериментальных данных методом *k*-средних

№ кластера	Элементы кластера	Расстояние до центра кластера
1	WOG 95	0,098919
	Mustang 95	0,224353
	Mustang 95	0,413045
	Socar 95	0,247378
	WOG 95	0,159866
2	ANP 95	0,121654
	Авиас 95	0,291654
	Socar 95	0,408788
3	БРСМ 92	0,268367
	БРСМ 92	0,138120
	WOG 92	0,273787
4	Shell 95	0,212538
	ТНК 95	0,212538
5	ANP 92	0,283573
	Авиас 92	0,283573
6	ТНК 95	0
7	Okko 95	0
8	ANP 95	0
9	ТНК 92	0
10	Socar 92	0
11	Okko 92	0

тров, особенно удельного сопротивления. С другой стороны, наличие одиночных кластеров говорит об относительно малом числе наблюдений. При дальнейшем заполнении таблицы данными новых образцов число кластеров, очевидно, будет стремиться к некоей оптимальной величине.

В нашем случае, однако, более наглядной оказалась классификация полученных данных методом анализа главных компонент [13]. Использование этого метода позволяет понизить размерность исходной трехмерной базы данных до двух главных компонент (ГК), и тогда каждое отдельное наблюдение представляется точкой на плоскости в прямоугольной системе координат ГК1 и ГК2.

На рис. 5 представлена проекция данных из табл. 2 на плоскость главных компонент (проценты на осях указывают «удельный информационный вес» каждой из координат). Здесь видно, что массив экспериментальных данных визуально формирует четыре области с одинаковыми значениями октанового числа (их границы обведены), причем область из пяти компактно рас-

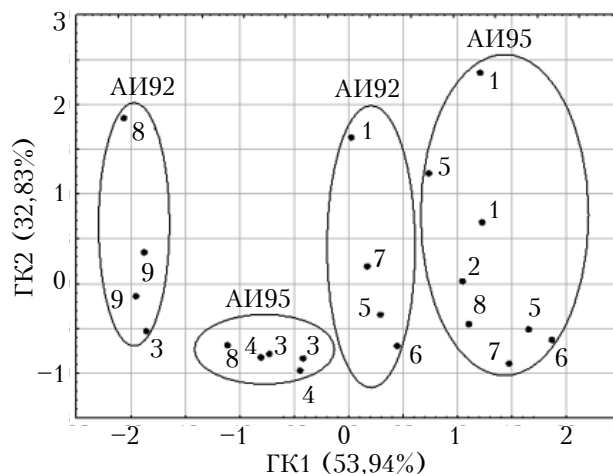


Рис. 5. Распределение на плоскости главных компонент исследуемых образцов бензина:

1 – ТНК; 2 – Shell; 3 – WOG; 4 – Mustang; 5 – ANP; 6 – Авиас; 7 – Okko; 8 – Socar; 9 – БРСМ

положенных образцов бензина АИ95 (в нижней части диаграммы) имеет свое отображение и в предыдущей классификации методом кластеризации *k*-средних – это кластер №1 в табл. 3 (в свою очередь, образцы бензина, принадлежащие кластерам № 2, 3, 5, также компактно сгруппированы на плоскости ГК). Остальные выделенные на рис. 5 области (две области с бензином АИ92 и одна с АИ95) оказались «растянутыми» по плоскости вдоль второй главной компоненты ГК2. Фактически, это позволяет использовать для экспрессной оценки величины октанового числа проекцию наблюдений только на первую компоненту ГК1.

Как показали эксперименты, отмеченные на диаграмме рис. 5 области имеют достаточно четкие и повторяемые границы, что свидетельствует о потенциальной возможности экспрессной оценки октанового числа автомобильного бензина с помощью статистических методов анализа многомерных данных, получаемых из измерения физико-химических параметров исследуемых образцов топлива.

Выводы

Предложенный способ определения электрофизических характеристик электроизоляционных жидкостей обеспечивает более точное, в сравнении с традиционными методами, измерение удельного сопротивления автомобильного бензина за счет исключения влияния на результаты измерений поляризационных эффектов, а также использования тестирующего сигнала более низкой частоты. Сконструированный макет портативного устройства простой конструкции позволяет измерять диэлектрическую проница-

емость и удельное сопротивление электроизоляционных жидкостей.

Анализ предложенного подхода к проведению классификации марок товарного автомобильного бензина с использованием статистических методов анализа многомерных данных, получаемых при измерении параметров бензина, показал, что в данном случае более предпочтительным является метод анализа главных компонент, а не кластерного анализа, что может быть обусловлено относительно небольшим числом исследуемых проб автомобильного бензина. С другой стороны, не совсем удачная попытка кластеризации полученного массива данных свидетельствует о необходимости его расширения за счет дополнительно измеряемых физико-химических параметров бензина, какими могут быть, например, кислотность, давление насыщенных паров и др.

Предложенные экспериментальный и методический подходы могут в дальнейшем послужить основой для разработки прототипов коммерческих приборов для экспрессного определения октанового числа автомобильного бензина.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скворцов Б.В., Силов Е.А. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — Т. 11, № 5. — С. 64–71.
2. Руднев В.А., Бойченко О.П., Карножицкий П.В. Класифікація товарних бензинів та легких газоконденсатних фракцій родовищ східних областей України на основі діелектрометричних та газохромографічних даних // Методы и объекты химического анализа. — 2010. — Т. 5, № 3. — С. 148–157.
3. Подъячева К.И., Тузова В.В., Гарипов И.И., Дезорцев С.В. К определению октановых чисел нефтепродуктов // Башкирский химический журнал. — 2013. — Т. 20, № 2. — С. 99-102.
4. Пат. 2305283 России. Способ определения октанового числа бензинов / В.Н. Астапов. — 27.08.2007.
5. ГОСТ Р 51105-97. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин, технические условия.
6. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.
7. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
8. Кукла А.Л., Павлюченко А.С., Майстренко А.С., Мамыкин А.В. Импедансный анализатор для идентификации марок водно-спиртовых напитков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 1. — С. 15–21
9. 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.
10. Миркин Б.Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор. — Москва: Изд. дом Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики", 2011.
11. Мамикін А.В., Кукла О.Л., Майстренко А.С., Павлюченко О.С., Мацас Є.П. Застосування методу імпедансної спектроскопії для визначення електрофізичних характеристик діелектричних рідин // Тр. 18-ї МНПК «СИЕТ-2017». — Україна, м. Одеса. — 2017. — С. 97–98.
12. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Полункин Е.В., Старжинская Л.И. Использование метода импедансной спектроскопии для анализа бензанолевого топлива // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2-3. — С. 61-67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.61>
13. Jurs P.C., Bakken G.A. and McClelland H.E. Computational Methods for the Analysis of Chemical Sensor Array Data from Volatile Analytes // Chemical Review. — 2000. — Vol. 100. — P. 2649–2678.

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.07 2017 г.

А. В. МАМИКІН, О. Л. КУКЛА, А. С. МАЙСТРЕНКО, Є. П. МАЦАС, Л. М. МАТВІЄНКО

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: kukla@isp.kiev.ua

СПОСІБ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОІМПЕДАНСНОГО ВИМІРЮВАЧА І МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Запропоновано спосіб визначення електрофізичних характеристик електроізоляційних рідин на прикладі бензину різних марок, заснований на спектроімпедансних вимірах конденсаторної електрохімічної комірки, заповненої досліджуваною рідиною, при прикладанні синусоїдальної тестової напруги в області частот 0,1–10 Гц, що забезпечує більш точні вимірювання в порівнянні з відомими традиційними методами. Розроблений та сконструйований портативний вимірник повного електричного опору (імпедансу) діелектричних рідин. Запропонований і протестований підхід до експресної оцінки октанового числа автомобільного бензину за допомогою спектроімпедансних вимірювань та використання статистичних методів аналізу багатовимірних даних.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, автомобільний бензин, питомий опір, діелектрична проникність, статистичний аналіз.

A METHOD FOR EXPRESS ESTIMATION OF THE OCTANE NUMBER
OF GASOLINE USING A PORTABLE SPECTROIMPEDANCE METER AND
STATISTICAL ANALYSIS METHODS

The authors propose a method for determination of the electro-physical characteristics of electrical insulating liquids on the example of different types of gasoline. The method is based on the spectral impedance measurements of a capacitor electrochemical cell filled with the liquid under study. The application of sinusoidal test voltage in the frequency range of 0,1–10 Hz provides more accurate measurements in comparison with known traditional methods. A portable device for measuring total electrical resistance (impedance) of dielectric liquids was designed and constructed. An approach for express estimation of octane number of automobile gasoline using spectroimpedance measurements and statistical multi variation methods of data analysis has been proposed and tested.

Keywords: impedance spectroscopy, automobile gasoline, resistivity, dielectric constant, statistical analysis.

REFERENCES

1. Skvortsov B.V., Silov E.A. [Investigation of correlation dependencies between the octane number and electrodynamic parameters of hydrocarbon products]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 5, pp. 64-71. (Rus)
2. Rudnyev V.A., Boichenko O.P., Karnozhits'kii P.V. [Classification of commercial gasoline and light gas condensate fractions of fields of Ukraine eastern regions on the basis of dielectrometric and gas chromatographic data]. *Methods and Objects of Chemical Analysis*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 148-157. (Rus)
3. Pod'yacheva K.I., Tuzova V.V., Garipov I.I., Dezortsev S.V. [To the octane number determination of petroleum products]. *Bashkirskii Khimicheskii Zhurnal*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 99-102. (Rus)
4. Astapov V.N. [Method for determination of the octane number of gasolines] Pat. RF, no. 2305283, 2007.
5. GOST P 51105-97. *Topliva dlya dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Neetilirovannyi benzin, tekhnicheskie usloviya* [State standard P 51105-97. Fuels for internal combustion engines. Lead-free gasoline, specifications. Moscow, 1997]
6. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.
7. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
8. Kukla A.L., Pavlyuchenko A.S., Maistrenko A.S., Mamykin A.V. [Impedance analyzer for trademarks of aqueous-alcoholic drinks identification]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2012, no 1, pp. 15–21. (Rus)
9. Kukla A.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 Microsystems Technologies*, 2012, vol. 3 (9), no. 3, pp. 6-15 (Rus)
10. Mirkin B.G. [Cluster analysis methods for decision support: A Review]. Moscow, Izd. dom Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta "Vysshaya shkola ekonomiki", 2011. (Rus)
11. Mamykin A.V., Kukla O.L., Maistrenko A.S., Pavluchenko A.S., Matzas E.P. [Using of the impedance spectroscopy method for determination of electrophysical characteristics of dielectric liquids]. *Proc. of the 18th Int. scientific-pract. conf. "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2017, pp. 97-98 (Rus)
12. Kukla A.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S., Polunkin E.V., Starzhinska L.I. [Application of impedance spectroscopy method for analysis of benzanol fuels]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2015, no 2–3, pp. 61-67(Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.2-3.61>
13. Jurs P.C., Bakken G.A. and McClelland H.E. *Computational Methods for the Analysis of Chemical Sensor Array Data from Volatile Analytes*. Chemical Review, 2000, vol. 100, pp. 2649–2678.