

# СУМІЖНІ ПРОБЛЕМИ РАДІОТЕХНІКИ СМЕЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОТЕХНИКИ RELATED PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING

УДК 537.226.3

DOI:10.30837/rt.2021.4.207.18

*Б.В. ЖУКОВ, канд. техн. наук, С.И. БОРБУЛЕВ, А.В. ОДНОВОЛ*

## ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ГОРЮЧЕСМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕСЯМИ

### Введение

Надежность работы современных двигателей внутреннего сгорания существенно зависит от качества горючесмазочных материалов (ГСМ). Поэтому развитию методов контроля качества ГСМ, в том числе экспресс-методов, основанных на измерении их диэлектрической проницаемости, в настоящее время уделяется большое внимание [1 – 6].

Возрастающие требования к топливам и моторным маслам приводят к необходимости введения дополнительных присадок, что усложняет химический состав и процесс контроля их качества [7 – 12].

Резонаторный метод СВЧ диэлектromетрии [13] обеспечивает высокое разрешение действительной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, необходимое для анализа жидких горючесмазочных материалов (ГСМ). Данный метод может быть реализован в виде экспресс-анализатора октановых чисел неэтилированных бензинов [14] или экспресс-анализатора качества образцов жидких горюче-смазочных материалов по положению соответствующих этим образцам точек на комплексной плоскости [15].

В первом варианте экспресс-анализатор должен быть прокалиброван под конкретную технологию производства бензинов [14]. Во втором варианте экспресс-анализатор универсален, то есть не зависит от вида технологии производства ГСМ, однако для получения количественной оценки требует разработки модельного перехода от положения точки на комплексной плоскости к интересующему параметру образца ГСМ.

Предварительные исследования образцов жидких ГСМ (бензины дизельные топлива, керосины, масла) показали, что величины  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  перечисленных ГСМ находятся в рабочем диапазоне резонаторного СВЧ диэлектromетра. При этом на комплексной плоскости точки, соответствующие рассмотренным ГСМ, располагаются отдельными непересекающимися группами [15].

Высокая разрешающая способность СВЧ резонаторного метода определяет перспективность использования данного метода для анализа комплексной диэлектрической проницаемости смесей ГСМ с различными примесями, включая воду, спирты [16], бензол и др.

### Основная часть

#### *Смесь бензина с бензолом.*

Одной из наиболее вредных примесей в составе бензинов является бензол, октановое число которого по моторному методу составляет 100 о.е. (октановых единиц). Наличие бензола вредно как для самого двигателя, так и для окружающей среды. Допустимое содержание бензола в составе бензина в настоящее время строго ограничивается, поэтому представляет интерес возможность оперативного выявления примеси бензола.

На рис. 1 на комплексной плоскости представлены результаты исследования комплексной диэлектрической проницаемости смеси «бензин + бензол».

По оси абсцисс отложена разность  $\Delta f(\varepsilon') = f_0(\varepsilon') - f_{см}(\varepsilon')$  резонансных частот резонатора, нагруженного пустой кюветой  $f_0(\varepsilon')$ , и резонатора, нагруженного исследуемой сме-

сью бензина с бензолом  $f_{см}(\epsilon')$ . По оси ординат отложены величины тока, прошедшего через резонатор, нагруженный исследуемой смесью бензина с бензолом  $I(\epsilon'')$ . При этом величина тока при установленной пустой кювете во всех опытах устанавливалась равной 200 мкА.

Точка 1 на рис. 1 соответствует бензину, точка 2 – смеси 5 % бензола с бензином, точка 3 – смеси 10 % бензола с бензином, точка 4 – смеси 15 % бензола с бензином и точка 5 – бензолу.

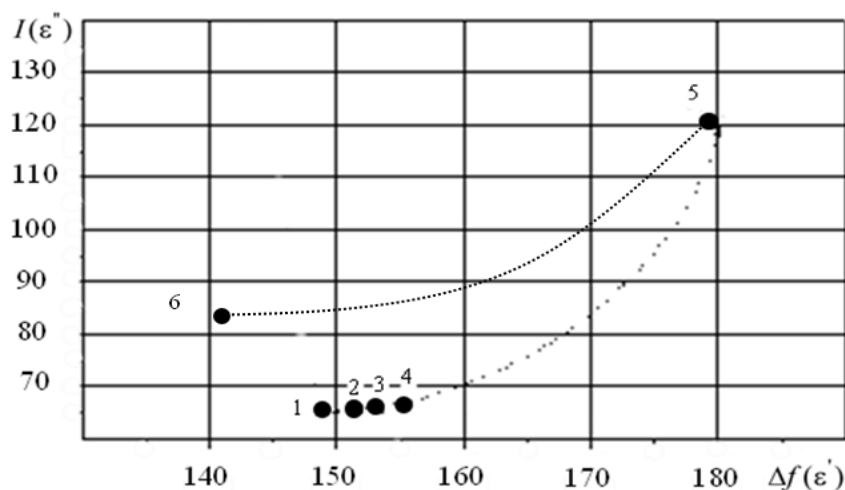


Рис. 1. Результаты исследований смеси «бензин + бензол»

Данные на рис. 1 показывают, что при малой процентной добавке бензола наблюдается существенное возрастание действительной части  $\Delta f(\epsilon')$  диэлектрической проницаемости смеси, а величина мнимой составляющей  $I(\epsilon'')$  смеси остаётся практически неизменной.

При увеличении процентного содержания бензола от 15 % и выше наблюдается как увеличение действительной  $\Delta f(\epsilon')$ , так и мнимой  $I(\epsilon'')$  составляющих диэлектрической проницаемости смеси.

Очевидно, что для смеси с бензолом (точка 5) другого исходного образца бензина, соответствующего, например, точке 6 на рис. 1, произойдет изменение расположения линии смеси 6 – 5, на комплексной плоскости (рис. 1). Для определения местоположения аппроксимирующей кривой 6 – 5 потребуется проведение исследований для образцов смесей нового бензина с бензолом.

#### *Смесь трансформаторного масла с водой.*

Основным требованием к трансформаторному маслу, обеспечивающим безопасность эксплуатации высоковольтных трансформаторов является минимизация в нем количества воды. Так, для заливки трансформаторов разрешается масло, в котором не более 14 граммов воды на тонну масла. Из-за особенностей технологического процесса заливки масла возможно попадание воды в заливаемое масло, что определяет необходимость текущего контроля количества воды в процессе его заливки в высоковольтные трансформаторы.

Однако в настоящее время отсутствует техническая возможность текущего, то есть в реальном времени, определения количества воды на уровне 10 грамм в тонне масла (разрешение на уровне до  $10^{-5}$ ). Поэтому для контроля количества воды применяют стандартизованный метод, суть которого заключается в измерении напряжения электрического пробоя масла, размещенного в мерной емкости.

Очевидно, что этот метод не может быть реализован в процессе заливки, поэтому контроль количества воды в масле осуществляется перед началом и после окончания процесса заливки. Таким образом, соответствие требованию не более 14 грамм воды на тонну масла

залитого в трансформатор может быть установлено только после окончания процесса его заливки.

На рис. 2 представлены результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости трех образцов трансформаторного масла: 1 – 14 грамм воды на тонну масла; 2 – 26 грамм воды на тонну масла и 3 – 56 грамм воды на тонну масла.

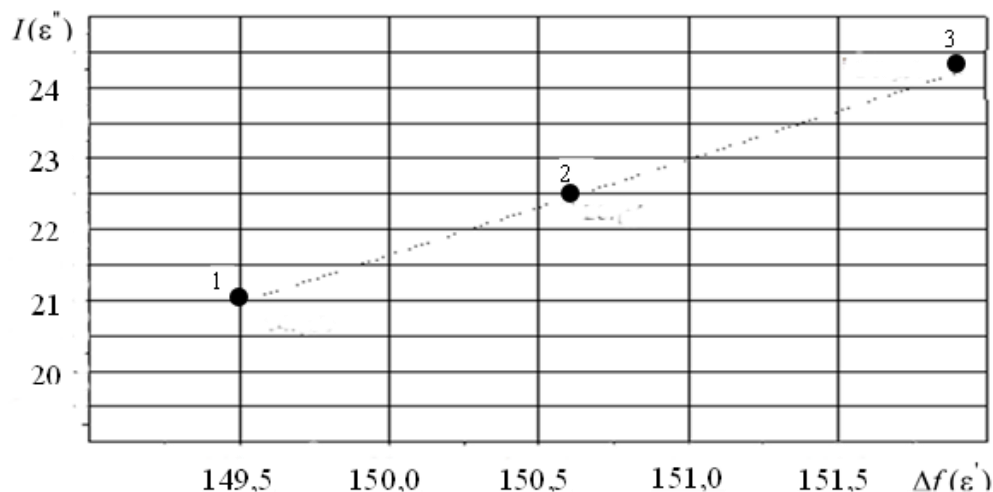


Рис. 2. Смесь трансформаторного масла с водой

По оси абсцисс также отложена разность  $\Delta f(\epsilon')$  резонансных частот резонатора, нагруженного пустой кюветой  $f_0(\epsilon')$ , и резонатора, нагруженного исследуемой смесью трансформаторного масла с водой  $f_{см}(\epsilon')$ . По оси ординат отложены величины тока  $I(\epsilon'')$ , прошедшего через резонатор, нагруженный исследуемой смесью трансформаторного масла с водой.

Данные на рис. 2 свидетельствуют, что СВЧ диэлектрометр позволил отдельно определить на комплексной плоскости представленные образцы смесей масла с водой, поэтому метод СВЧ диэлектротрии может считаться перспективным для контроля качества трансформаторного масла как в процессе заливки, так и для контроля соответствия масла в процессе эксплуатации высоковольтных трансформаторов. В обеих ситуациях контроль диэлектрической проницаемости исследуемого масла необходимо проводить синхронно с контролем диэлектрической проницаемости эталонного образца масла.

#### *Бензины с добавкой спиртов.*

В настоящее время все большее внимание уделяется производству и применению высокооктановых бензинов, полученных по технологии «смешения» низкооктановых бензинов с высокооктановыми техническими спиртами. Основными достоинствами спиртовых бензинов являются более высокая экологичность и меньшая себестоимость по сравнению с традиционными чисто нефтяными и газовыми аналогами [16, 17].

Для автомобильных бензинов актуальной задачей остается контроль качества в процессе производства и при транспортировке и хранении. Традиционные высокооктановые бензины производятся на крупных НПЗ в соответствии с ДСТУ. Отличительной особенностью НПЗ является использование полного цикла производства бензинов – от исходного сырья до высокооктановой готовой продукции. Контроль качества готовой продукции производится в специализированных лабораториях заводов в рамках стандартизованных методов.

Производители спиртовых бензинов обычно производят продукцию на мини-заводах, при этом параметры спиртовых бензинов соответствуют требованиям ТУ, а не ДСТУ [16]. Контроль параметров готовой продукции может производиться эпизодически, например в

лабораториях крупных НПЗ или нефтебаз. Поэтому представляет интерес перспективность использования результатов экспресс-анализа комплексной диэлектрической проницаемости спиртовых бензинов для контроля их качества.

Для получения высокооктанового бензина в низкооктановый бензин добавляют технический спирт – неочищенный, с большим количеством сивушных масел, обезвоженный и денатурированный бензином.

Спиртовое топливо делится на две категории – автобензин с содержанием биоэтанола не менее 30 % относится к альтернативным топливам, а если биоэтанола менее 30 %, то оно не является альтернативным, а относится к спиртовому [16]. Спиртовые марки бензинов и альтернативные топлива выпускаются по разным нормативным документам.

Основным недостатком бензиново-спиртовых топлив является их фазовая нестабильность, обусловленная наличием в них небольших количеств воды и, как следствие, ограниченной взаимной растворимостью компонентов. Введением в спиртовые топлива соответствующих модификаторов и стабилизаторов удастся преодолеть возникающие трудности. Наибольшее влияние на расслаиваемость спиртовых бензинов оказывает содержание воды. Для обеспечения стабильности бензинов со спиртами при производстве, хранении и применении необходимо: предотвращать попадание в них воды; использовать стабилизирующие добавки или, иначе говоря, соразтворители, гомогенизирующие систему бензин – вода – спирт [16].

Необходимость введения стабилизирующих добавок существенно усложняет состав спиртовых бензинов. Так как спиртовые бензины производят по ТУ, то производитель сам определяет химический состав готового продукта, в том числе количество «вредных» составляющих, например, того же бензола, который приводит к повышенному износу цилиндров двигателя и, конечно, наносит вред окружающей среде. Если учесть, что и основа – низкооктановый бензин – может быть получен от разных производителей, то результирующий химический состав высокооктановых спиртовых бензинов становится разнообразным.

Наличие в составе высокооктанового бензина спиртовой добавки очевидным образом приводит к увеличению его диэлектрической проницаемости по сравнению с нефтяными и газовыми аналогами. Действительно, при использовании 2 мл кюветы резонансная частота резонатора, нагруженного образцами спиртовых бензинов, выходила за рабочий диапазон резонатора диэлектromетра.

На рис. 3 приведены результаты предварительных исследований при использовании 1 мл кюветы для нескольких образцов спиртовых бензинов разных производителей.

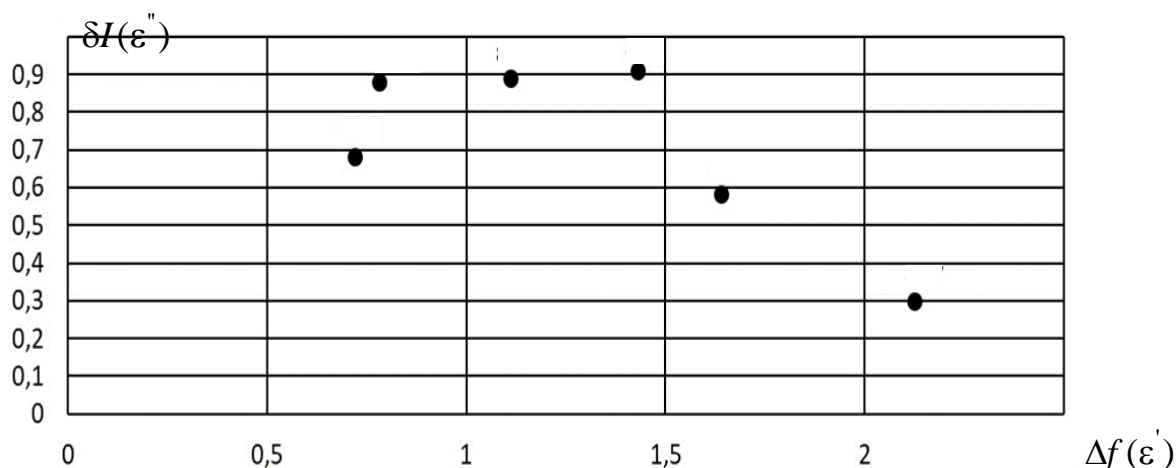


Рис. 3. Результаты исследования спиртовых бензинов

По оси абсцисс на этом рисунке отложены величины разности  $\Delta f(\varepsilon')$  резонансных частот резонатора, нагруженного пустой кюветой  $\Delta f(\varepsilon')$ , и резонатора, нагруженного образцом исследуемого спиртового бензина  $f_{c\delta}(\varepsilon')$ , а по оси ординат величины  $\delta I(\varepsilon'')$ , представляющие отношение величины тока, прошедшего через резонатор, нагруженный исследуемым бензином  $I_{c\delta}(\varepsilon'')$ , к аналогичной величине, когда резонатор нагружен пустой кюветой  $I_0(\varepsilon'')$ .

Данные на рис. 3 показывают, что результаты начального этапа исследований пока не позволяют выявить преобладающее влияние спиртовой добавки на расположение экспериментальных точек на комплексной плоскости. Например, образцам с различными октановыми числами по моторному методу 82,8 (точка 2) и 84,5 (точка 1) соответствуют близкие величины  $\Delta f(\varepsilon') < 0,8$  и  $\delta I(\varepsilon'') > 0,68$  и в то же время у образца с октановым числом 82,7 (точка 6) близким к октановому числу 82,8 (точка 2) соответствуют сильно отличающиеся величины –  $\Delta f(\varepsilon') = 2,12$  и  $\delta I(\varepsilon'') = 0,301$ .

Обеспечить требуемое октановое число производитель спиртовых бензинов может как путем увеличения содержания спирта, так и путем добавки других высокооктановых компонентов, например бензола, октановое число которого по моторному методу составляет 100 о.е. Очевидно, что интегральный химический состав у таких бензинов с близким октановым числом, а значит и положение соответствующих им точек на комплексной плоскости, будут различными.

Результаты исследований комплексной диэлектрической проницаемости спиртовых бензинов необходимо анализировать совместно с информацией о химическом составе образцов.

Кроме того, объема образцов 1 мл недостаточно для анализа спиртовых бензинов. Это следует из того, что перестройка резонансной частоты резонатора почти на порядок меньше, чем для обычных бензинов при объеме 2 мл. Поэтому необходимо увеличить объем образцов до 1,4 – 1,7 мл, чтобы восстановить разрешение по действительной части комплексной диэлектрической проницаемости спиртовых бензинов.

## Выводы

Метод СВЧ диэлектromетрии обеспечивает разрешение, достаточное для экспресс-анализа на комплексной плоскости смесей жидких горючесмазочных материалов, результирующая диэлектрическая проницаемость которых находится в рабочем диапазоне частот резонатора.

Для проведения экспресс-анализа смесей бензинов необходимы эталонные образцы исходного бензина (трансформаторного масла). При отсутствии эталонных образцов анализ возможен с помощью предварительно созданной базы данных комплексной диэлектрической проницаемости для наиболее типичных образцов исходного бензина (масла).

Учитывая широкое многообразие типов исходных бензинов и спиртов, используемых для производства высокооктановых спиртовых бензинов, исследование комплексной диэлектрической проницаемости целесообразно совместить с исследованием их химического состава.

## Список литературы:

1. М.А. Суслин. Микроволновый контроль авиационных ГСМ с использованием радиотехнических методов расчета цепей с распределенными параметрами. Москва : Машиностроение-1, 2006. 120 с.
2. М.П. Пархоменко, Д.С. Калёнов, И.С. Ерёмин, Н.А. Федосеев, В.М. Колесникова, Ю.Л. Баринов. Волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в СВЧ диапазоне и оценка погрешности измерений // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. С.1-19. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/6/text.pdf>.
3. А.В. Мамыкин, А.Л. Кукла, А.С. Мастренко, Е.П. Мацас, Л.М. Матвиенко. Способ экспресс-оценки октанового числа бензина с использованием портативного спектроимпедансного измерителя и методов статистического анализа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 4–5. С. 52-60. Метрология. Стандартизация ISSN 2225-5818.

4. С.А. Поляков Средство диэлектрометрического контроля бензина : дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2014. 122 с.
5. В.М. Колешко, В.Я. Сунка, А.А. Худницкий. Интеллектуальная система экспресс-контроля моторного топлива высокочастотными методами // Машиностроение : республ. межвед. сб. научн. трудов; М-во образования респ. Беларусь ; по материалам междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» ; под. ред. Б.М. Хрусталева / Белорусский национальный технический университет. Минск : БНТУ. Вып.25. С.354-359.
6. В.М. Колешко, В.Я. Сунка, А.В. Шиманович, Ю.В. Левый, В.О. Грибовский. Экспресс анализатор моторного топлива для автомобилей // Машиностроение: республ. межвед. сб. научн. трудов; по материалам междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» 06-09 апреля 2012 г. : в 2-х т. ; под. ред. Б.М. Хрусталева. Минск : БНТУ. 2012. Вып. 26, т.2. С. 248-255.
7. Р.А. Кремзер, К.В. Дорожкин, А.В. Бадьин, Д.С. Бодажков. Диэлектрические свойства автомобильного топлива с присадками в КВЧ диапазоне // 8-я Междунар. науч.-практ. конф. Актуальные проблемы радиофизики. АПР 2019 Сборник трудов конференции. 1-4 октября 2019, Томск. С.212-213.
8. Григоров А.Б., Карножицкий П.В., Слободской С.А. Диэлектрическая проницаемость как комплексный показатель, характеризующий изменение качества моторных масел в процессе их эксплуатации // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. №25. С. 169-175.
9. Григоров А.Б., Карножицкий П.В., Наглюк И.С. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации // Автомобильный транспорт. Харьков : ХНАДУ, 2007. №20. С. 95-97.
10. Ляпина О.В., Власов Ю.А., Ляпин А.Н. Метод идентификации моторного топлива в смазочном масле автомобильных агрегатов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 8). С. 1637-1641.
11. И.С. Наглюк Оценка качества моторных масел при эксплуатации легковых автомобилей // Автомобильный транспорт. 2011. Вып. 29. С.184-186.
12. О.В. Ляпина, Ю.А. Власов, А.Н. Ляпин. Метод идентификации моторного топлива в смазочном масле автомобильных агрегатов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 8). С. 1637-1641.
13. В.П. Шестопалов, К.П. Яцук Методы измерения диэлектрической проницаемости вещества на сверхвысоких частотах // Успехи физических наук. 1961. Т. LXXIV, вып. 4. С. 721-755.
14. Жуков Б.В. СВЧ диэлектрометр для экспресс-анализа октановых чисел автомобильных топлив // Датчики и системы. 2008. № 11. С.15-17.
15. Б.В. Жуков, С.И. Борбулев. Оперативный контроль параметров жидких горюче-смазочных материалов // Радиотехника 2019. Вып. №196. С. 62-69.
16. Сысоев Д. «Спиртовой» бензин в Украине – достойная альтернатива или обман? // Автохимия. Институт потребительских экспертиз. Опубл. 2021.03.24.
17. Плюсы и минусы использования спиртового бензина // <https://plusimirusi.ru/plyusy-i-minusy-ispolzovaniya-spirovogo-benzina>.

*Поступила в редколлегию 04.10.2021*

*Сведения об авторах:*

**Жуков Борис Владимирович** – канд. техн. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, старший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации; Украина; e-mail: [zkov31@meta.ua](mailto:zkov31@meta.ua)

**Борбулев Станислав Игоревич** – Институт современной обработки металлов; Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, соискатель; Украина; e-mail: [Stanislav.borbulev@gmail.com](mailto:Stanislav.borbulev@gmail.com)

**Одновол Андрей Владимирович** – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, младший научный сотрудник; Украина.