

На правах рукописи



МАКШАКОВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА РЕЛАКСАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОТОРНЫХ МАСЕЛ**

Специальность: 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2021

Работа выполнена в Сарапульском политехническом институте (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Научный руководитель: Подкин Юрий Германович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Шкатов Петр Николаевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры физики и химии материалов имени
Догадкина Б.А., ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет» (г. Москва)

Краснов Андрей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и
метрология», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» (г. Уфа)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и
газа (национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина»

Защита диссертации состоится 30 апреля 2021 г. в 14 часов на заседании
объединенного диссертационного совета Д 999.230.02 в УдмФИЦ УРО РАН по
адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в
библиотеке и на сайте УдмФИЦ УРО РАН, <http://udman.ru/ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,
просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу:
426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Т.М. Махнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод измерений, основанный на взаимодействии электрического поля с диэлектриками, широко используется для качественного анализа материалов и веществ в различных областях техники. Он позволяет проводить экспрессный, непрерывный неразрушающий контроль различных материалов и готовой продукции, при этом сами измерительные устройства просты в использовании и не требуют высоких затрат при технической реализации. Поскольку моторные масла являются хорошими диэлектриками, а масштабы их производства и потребления носят поистине глобальный характер, необходимость в разработке диэлектрических средств их контроля не вызывает сомнения.

Однако в настоящее время ассортимент диэлектрических анализаторов моторных масел довольно ограничен и в основном представлен узкополосными преобразователями и портативными индикаторами состояния на основе сравнения, как правило, одного компонента комплексной диэлектрической проницаемости свежего и эксплуатируемого масла. Главным же недостатком является положенный в основу работы анализаторов принцип воздействия на исследуемый материал. Спектр частот воздействующего измерительного сигнала, как правило, довольно узок и зачастую выбирается не по информационным критериям, а исходя из прикладных технических или технологических соображений. Однако диэлектрические характеристики моторных масел неравномерны в диапазоне частот от инфранизких до сверхвысоких. И дифференциальные характеристики этих зависимостей могут быть использованы для получения дополнительной информации о их состоянии и свойствах. Особенно ярко неравномерность диэлектрических характеристик выражена у эксплуатируемых моторных масел, которые представляют собой сложные дисперсные системы. В моночастотном режиме это обстоятельство затрудняет эффективный контроль, однозначную интерпретацию результатов в зависимости от структуры и состава исследуемых образцов и одновременно повышает требования к метрологическим характеристикам средств диэлектрического контроля моторных масел. Использование в качестве информационной среды спектра сигналов существенно облегчает формирование измерительной системы.

По этой причине разработка средств контроля диэлектрических характеристик смазочных материалов с улучшенными метрологическими характеристиками для систем мониторинга является **актуальной** задачей, решение которой будет способствовать увеличению срока службы моторных масел, экономии природных ресурсов, применяемых для их изготовления, и повышению качества природной среды.

Степень разработанности темы. Теория диэлектрического контроля базируется на трудах К. В. Вагнера, П. Дебая, Г. А. Лоренца, Д. К. Максвелла, Г. Фрелиха. Теоретическим и прикладным вопросам диэлектрического контроля посвящены многочисленные исследования от классических работ по теории диэлектриков В. Брауна, Г. И. Сканава, Ф. Эме до современных трудов Н. П. Богородицкого, Т. Грина, В. И. Ермакова, Ю. В. Подгорного, Ю. Г. Подкина, А. А. Потапова, Б. Ридли, Т. Л. Челидзе, Т. Ханай и других исследователей. Методике диагности-

рования эксплуатируемого моторного масла по диэлектрическим характеристикам в настоящее время посвящены работы О.Б. Боднаря, Ю.В. Власова, А.А. Хазиева и других. Изучены информационные возможности составляющих комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот и воздействий. Разнообразие диэлектрических спектров горюче-смазочных материалов открывает принципиально новый подход к созданию средств диэлектрического контроля качественных и количественных характеристик нефтепродуктов. Но для проведения наиболее информативных измерений диэлектрических характеристик в частотной области требуется сложная аппаратура и методы обработки информации.

Решение создавшейся проблемы возможно путем перехода от частотного преобразования диэлектрических характеристик к временному преобразованию. С этой целью можно использовать релаксационные измерительные преобразователи диэлектрических характеристик. Измерительный сигнал в данном случае имеет форму импульса определенной длительности, а отклик представляет собой переходную характеристику. Недостатком таких преобразователей является невысокая инвариантность каналов преобразования и ограниченные диапазоны измерения электрической емкости и сопротивления, а также относительно высокая погрешность измерений.

Объектом исследования являются релаксационные измерительные преобразователи диэлектрических характеристик моторных масел.

Предмет исследования – способы и средства независимого преобразования диэлектрических характеристик моторных масел в эквивалентные релаксационные электрические характеристики.

Целью диссертационной работы является разработка релаксационных измерительных преобразователей диэлектрических характеристик моторных масел с улучшенными метрологическими характеристиками.

Задачи исследования.

1 Разработка методики определения диэлектрических характеристик моторных масел с применением универсальных средств измерения с гармоническим измерительным сигналом, обоснование преимуществ использования временного преобразования.

2 Разработка релаксационных измерительных преобразователей параметров резистивно-емкостных двухполюсников с расширенными диапазонами преобразования, повышенной точностью и инвариантностью.

3 Создание на основе разработанных измерительных преобразователей многоканального аппаратно-программного комплекса для определения и исследования релаксационных электрических характеристик моторных масел.

4 Разработка способа мониторинга моторных масел по их релаксационным электрическим характеристикам.

Методология и методы исследования. При решении диссертационных задач использовались элементы теории переходных процессов, методы математического моделирования, методы конструкторского проектирования средств диэлектрического контроля для создания макетов измерительных преобразователей, методы математической статистики при обработке экспериментальных данных и

при определении метрологических характеристик созданных средств измерений, элементы теории релаксационной поляризации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующих результатах.

1 Методика повышения разрешающей способности по составляющим комплексного сопротивления универсальных средств измерения с гармоническим измерительным сигналом, в частности, измерителей добротности, позволяет их использовать для частотной двухканальной диэлектрической спектроскопии моторных масел.

2 Способ измерения активного сопротивления резистивно-емкостного двухполюсника инвариантно емкости (патент РФ № 2461841), использован для создания измерительных преобразователей параметров резистивно-емкостных двухполюсников с расширенными диапазонами преобразования, повышенной точностью и инвариантностью по каналам измерения.

3 Способ определения эксплуатационных характеристик моторных масел путем временной диэлектрической спектроскопии в области инфранизкочастотной и низкочастотной релаксации, позволяющий исследовать статические и динамические качественные показатели свежих и эксплуатируемых моторных масел.

4 Способ мониторинга эксплуатируемых моторных масел по изменению их релаксационных электрических характеристик.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением фундаментальных положений теоретической физики и электротехники при моделировании и разработке измерительных преобразователей, применением научно обоснованных методов обработки измерительной информации, использованием поверенных средств измерений.

Полученные в диссертации результаты соответствуют п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», п. 2 «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля», п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами», п.6 «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля» паспорта научной специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Теоретическая и практическая значимость. Развита теоретические положения, позволяющие анализировать диэлектрические характеристики моторных масел стандартными средствами измерения с гармоническим сигналом, в частности – измерителями добротности. Развита алгоритмы формирования и обработки измерительной информации о диэлектрических характеристиках неполярных гетерогенных жидкостей. Результаты диссертационного исследования мо-

гут быть использованы при построении средств качественного анализа гетерогенных неполярных жидкостей, в частности моторных масел.

На защиту выносятся следующие положения.

1 Разработанная методика измерения параметров резистивно-емкостных двухполюсников с применением измерителя добротности позволила выявить смещение дисперсии диэлектрической проницаемости и максимума потерь моторных масел в область инфранизких и низких частот, что подтверждает целесообразность разработки релаксационных измерительных преобразователей диэлектрических характеристик, ориентированных на эти частотные диапазоны.

2 Измерительное преобразование, основанное на импульсном стробировании дифференциатора с введенным в его состав измеряемым резистивно-емкостным двухполюсником, а также самого двухполюсника, зашунтированного дополнительными элементами, позволяет отображать, исследовать и интерпретировать переходные процессы в области инфранизких и низких частот. Из продолжительностей переходных процессов рассчитываются емкость и сопротивление измеряемого резистивно-емкостного двухполюсника с приемлемой точностью и инвариантностью.

3 Аппаратно-программная реализация дополнительных информационных каналов (время, температура масла) к основному измерительному преобразованию позволяют формировать релаксационные электрические характеристики моторных масел, которые отражают скорость и интенсивность поляризации входящих в структуру компонентов. По динамике изменения релаксационных электрических характеристик эксплуатируемого масла относительно свежего возможен трехпараметровый (емкость, крутизна характеристики сопротивления, время релаксации) эксплуатационный контроль масла в состоянии покоя.

4 В процессе эксплуатации моторных масел происходит рост их релаксационных электрических емкости и сопротивления. По контролю изменения емкости и сопротивления относительно параметров свежего масла возможен двухэтапный мониторинг состояния масла – во время прогрева двигателя и при его рабочей температуре.

Апробация работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований апробированы и обсуждены на конференциях: «Информационное обеспечение инновационных технологий», Сарапул, 2008 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», Самара, 2010 г.; Республиканская научно-методическая очно-заочная конференция «Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий», Сарапул, 2010 г.; Научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании» факультета «Информатика и вычислительная техника» ИжГТУ, Ижевск, 2010 г., 2011 г.; Региональная научно-методическая конференция «Институциональное и информационно-техническое обеспечение инновационных технологий», Сарапул, 2014 г.; I Межвузовская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы науки и техники», Сарапул, 2020 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 20 научных публикациях, в том числе 6 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК, и 2 патентах на изобретение.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования, разработка алгоритмов измерительного преобразования, релаксационных измерительных преобразователей, их макетирование и интегрирование в аппаратно-программный комплекс определения релаксационных электрических характеристик моторных масел, постановка эксперимента, обработка измерительной информации, интерпретация полученных данных выполнены автором лично. Разработка методики определения диэлектрических характеристик моторных масел с применением стандартных средств измерений, формулирование основных теоретических положений выполнены совместно с научным руководителем.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в программе подготовки магистров по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», в процессе технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания автотранспортных средств Сарапульского автотранспортного цеха ООО «Технологический транспорт», а также внедрены в технологический процесс производства обессоленной воды на ОАО «Элеконд».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 111 наименований и приложения. Содержание работы изложено на 130 страницах машинописного текста, включает 56 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы объект и предмет исследования, определены цель и задачи работы.

В первой главе приведен сравнительный анализ методов и средств определения свойств моторных масел (ММ). Показано, что большей частью разработчиков в основу построения портативных средств мониторинга эксплуатируемых ММ положен метод диэлектрического контроля, так как он наиболее полно отвечает основным требованиям, предъявляемым к этим средствам: экспрессность и непрерывность измерений, простота использования, точность, надежность и невысокая стоимость средств измерений.

Проведен обзор существующих средств диэлектрического контроля эксплуатируемых ММ. В большинстве случаев оценка состояния ММ производится по одному параметру – относительной диэлектрической проницаемости, на фиксированной частоте, или в узком спектре частот. Эффективность известных широкополосных преобразователей снижена из-за захвата и анализа малоинформативных участков спектра. Моторные масла представляют собой гетерогенные дисперсные системы, подсистемами которых могут быть суспензии типа основание-углеводород, кислота-углеводород, а также эмульсии типа вода-углеводород. Проведен анализ известных данных о диэлектрических характеристиках таких дисперсных систем в широкой полосе частот – от 10^{-3} до $4 \cdot 10^9$ Гц, на основе ко-

того установлено, что с точки зрения мониторинга систем смазки наиболее информативны дисперсионные полосы частотных характеристик, расположенные в областях инфранизких, низких, радиочастот и сверхвысоких частот. Это позволило сделать вывод о том, что технические требования к оптимальным рабочим частотам измерительных преобразователей можно установить лишь после детального изучения диэлектрических характеристик ММ. Вместе с тем, в известных работах по созданию средств мониторинга выбирают, в основном, фиксированные рабочие частоты, исходя из конструктивных критериев, теряя значительный объем полезной информации, или, наоборот, используют сверхширокополосные измерительные преобразователи, неоправданно усложняя используемую аппаратуру.

Отсюда следует, что для получения достаточно полной информации о диэлектрических характеристиках работающего ММ, целесообразно воздействовать на него таким образом, чтобы учесть вклад доминирующих составляющих такой дисперсной системы. Это возможно, если отклик представляет собой аддитивный процесс релаксации всех видов элементов дисперсной фазы. Кроме того, большое удельное сопротивление ММ позволяет проводить преобразование диэлектрических характеристик в эквивалентные электрические характеристики в релаксационном режиме, что упрощает структуру измерительных преобразователей при технической реализации. Эти предпосылки и определили цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены вопросы методологии преобразования диэлектрических характеристик моторных масел в эквивалентные электрические характеристики. Разработана методика повышения точности измерений составляющих комплексного сопротивления резистивно-емкостных двухполюсников (*RC*-двухполюсников), основанная на использовании измерителей параметров *RC*-двухполюсников (в качестве примера использован измеритель добротности) и средств их калибровки на основе образцовых радиоэлементов. В калибровочной серии собственные характеристики измерителя параметров определяются в рабочем диапазоне частот. Впоследствии эти характеристики и параметры используются при расчете составляющих комплексного сопротивления измеряемых *RC*-двухполюсников.

В ходе обработки результатов измерения выяснилось, что среднеквадратическое отклонение значений измеренных емкостей минимально, относительная погрешность измерения емкости не превышает 3.2 % в диапазоне частот от 56.23 до 17780 кГц. Оценка значений сопротивлений возможна в ограниченном частотном диапазоне, который зависит от измеряемого сопротивления. С увеличением сопротивления *RC*-двухполюсника этот диапазон сужается, а погрешность измерения значительно возрастает (рисунок 1, *a* и *б*).

Были проведены исследования по выявлению наличия дисперсии диэлектрических характеристик моторных масел с помощью измерителя добротности. В качестве первичного измерительного преобразователя (ПИП) использовался изготовленный емкостный датчик коаксиального типа.

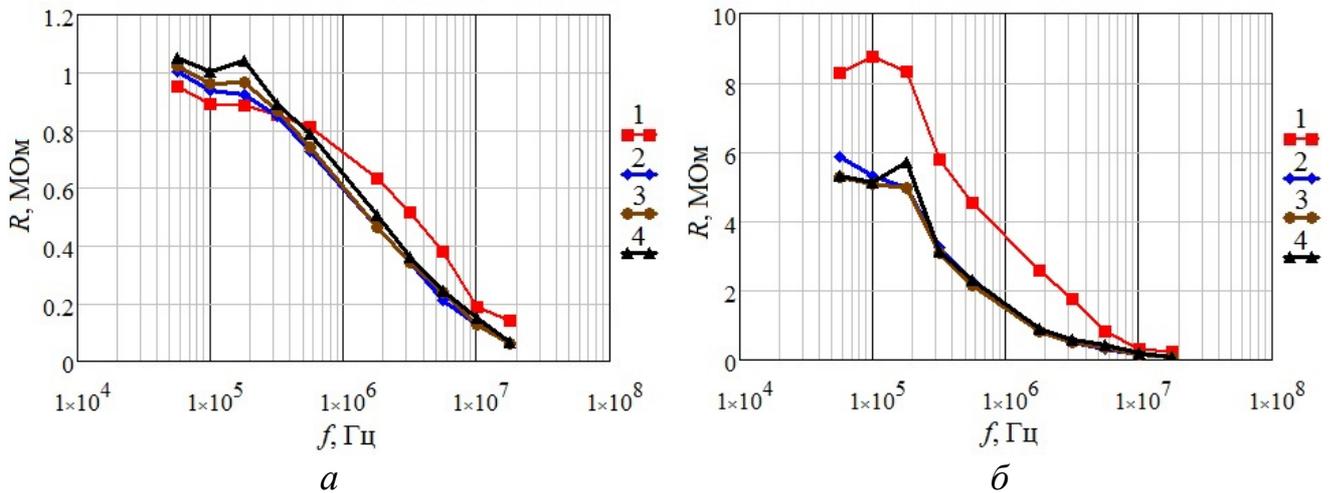


Рисунок 1 – Исследование функций преобразования по каналу сопротивления для 1 МОм (а) и 10.5 МОм (б) при шунтирующих емкостях: 1 – 0 пФ; 2 – 29.6 пФ; 3 – 39.4 пФ; 4 – 48.0 пФ

На рисунке 2 приведены результаты измерения эквивалентных емкости $C = C_{и}(\epsilon_m - 1)$ и сопротивления $R = (\rho\epsilon_0)/C_{и}$ для трех образцов моторных масел, где $C_{и}$ – изменяемая емкость датчика, ϵ_m – относительная диэлектрическая проницаемость масла, ρ – удельное сопротивление масла, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

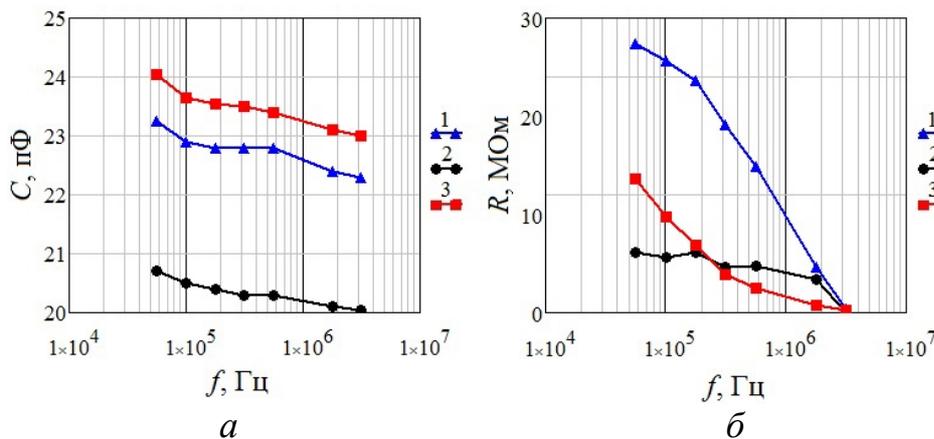


Рисунок 2 – Эквивалентная емкость $C_{и}(\epsilon_m - 1)$ (а) и сопротивление $R = (\rho\epsilon_0)/C_{и}$ (б) для ММ:
1 – отработавшее 7000 км ЛУКОЙЛ СУПЕР 5W-40;
2 – КАМАОЙЛ 20W-20; 3 – ЛУКОЙЛ ЛЮКС 5W-40

Исходя из результатов эксперимента, можно сделать вывод, что диэлектрические характеристики моторных масел неравномерны в диапазонах средних и высоких частот, что характерно для дисперсных систем. Из анализа диэлектрических характеристик в области частотной дисперсии

(рисунок 2), следует, что наиболее информативны низкие частоты, где интенсивно проявляются изменения диэлектрических потерь и максимальна крутизна дисперсии диэлектрической проницаемости. Исследование кинетики изменения диэлектрических характеристик в дисперсионной области обеспечивает максимальную информативность системы контроля. Однако анализ диэлектрических характеристик ММ в этой области частот требует применения довольно сложной, дорогостоящей аппаратуры. Поэтому необходим переход от частотного к временно-му представлению функций преобразования. Это потребует изучения диэлектрических характеристик ММ в релаксационном режиме, но существенно упростит и

удешевит техническую реализацию измерительных преобразователей и обеспечит массовое применение систем контроля ММ в моторостроении.

В третьей главе представлены теоретические модели релаксационных измерительных преобразователей (ИП) диэлектрических характеристик ММ. При

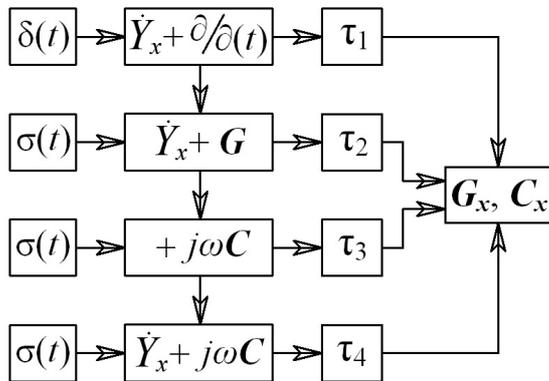


Рисунок 3 – Схема основного алгоритма измерительного преобразования

измерительном преобразовании составляющих комплексной проводимости $\dot{Y}_x = G_x + j\omega C_x$, где $G_x = 1/R_x$, реализуется преобразование $\varepsilon \rightarrow C_x$, $\rho \rightarrow R_x$. Определение параметров C_x и R_x относится к косвенным измерениям. На рисунке 3 изображена схема основного алгоритма измерительного преобразования параметров $R_x C_x$ -двухполюсника. Для повышения точности и инвариантности каналов преобразования измерение производится следующим образом. На первом этапе $R_x C_x$ -двухполюсник в составе дифференциатора сканируется δ -функцией (Дирака), при этом продолжительность переходного процесса τ_1 эквивалентна инфранизкочастотному диапазону. Исходя из значения τ_1 и номиналов элементов схемы дифференциатора, определяется R_x в первом приближении. Продолжительности $\tau_2 \dots \tau_4$ эквивалентны низкочастотному диапазону, определяются путем воздействия σ -функции (Хэвисайда, прямоугольного импульса длительностью τ_n) на $R_x C_x$ -двухполюсник зашунтированный дополнительным активным сопротивлением $R = 1/G$, R и дополнительной емкостью C и только емкостью C соответственно. Из $\tau_1 \dots \tau_4$ определяются R_x и C_x .

Для экспериментального исследования процессов измерительного преобразования разработан аппаратно-программный комплекс [20], функциональная схема которого представлена на рисунке 4 [2, 8]. Комплекс включает в себя ПИП, вторичный измерительный преобразователь (ВИП), блоки которого обведены пунктиром, датчик температуры масла (ДТМ) и персональный компьютер (ПК). Ядром ВИП является микроконтроллер (МК). Измерение продолжительностей переходных процессов осуществляется путем тактирования таймера-счетчика МК до момента срабатывания встроенного в МК аналогового компаратора, которое происходит при равенстве напряжения переходного процесса с напряжением генератора уставки (ГУ), которое составляет U_0/\exp , где U_0 – напряжение измерительного импульса. Буфер БФ представляет собой повторитель напряжения на операционном усилителе (ОУ) и необходим для минимизации влияния входного сопротивления вывода порта МК на результат измерения. Процесс

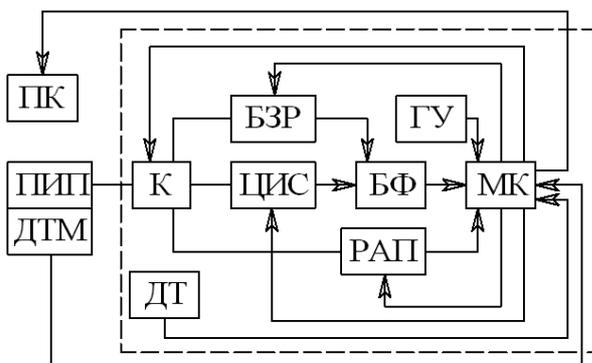


Рисунок 4 – Функциональная схема системы измерения эквивалентных релаксационных электрических характеристик ММ

Измерение продолжительностей переходных процессов осуществляется путем тактирования таймера-счетчика МК до момента срабатывания встроенного в МК аналогового компаратора, которое происходит при равенстве напряжения переходного процесса с напряжением генератора уставки (ГУ), которое составляет U_0/\exp , где U_0 – напряжение измерительного импульса. Буфер БФ представляет собой повторитель напряжения на операционном усилителе (ОУ) и необходим для минимизации влияния входного сопротивления вывода порта МК на результат измерения. Процесс

измерительного преобразования (рисунок 3) параметров $R_x C_x$ -двухполосника на схеме (рисунок 4) осуществляется блоками ЦИС (цепь измерения сопротивления) и БЗР (блок заряда-разряда). Если R_x , определенное в первом приближении, находится в интервале значений, меньших $R_{кр}$, при которых возрастает погрешность измерения $\tau_2 \dots \tau_4$, ПИП по сигналу МК подключается коммутатором (К) в состав релаксационного автогенераторного преобразователя (РАП), частота следования импульсов которого зависит от C_x . Измерение частоты выходного сигнала РАП производится тактированием встроенных таймеров-счетчиков МК. Температура внутри корпуса макета определяется датчиком температуры ДТ и необходима для термокоррекции результатов измерений. Пакет данных, содержащий измеренные параметры R_x , C_x и значение температуры масла, отправляется МК по интерфейсу RS-232 в ПК, где дополняется временем его прихода программой приема и обработки измерительной информации и записывается в память ПК.

Общая принципиальная электрическая схема БЗР и ЦИС представлена на рисунке 5 [6]. ЦИС реализована в виде дифференцирующей цепи [7, 12-14], образованной элементами C' , R' и R_x . На схеме $C_{пар}$ и $G_{пар}$ – паразитные параметры, VD – диод с малым током утечки, C_d в несколько раз больше C_x , $C' \gg C_x + C_{пар}$.

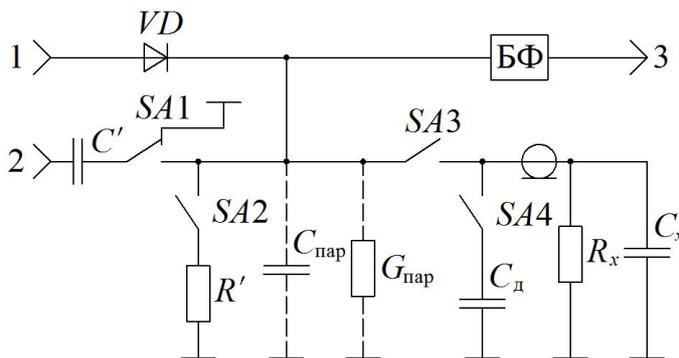


Рисунок 5 – Общая принципиальная схема БЗР и ЦИС (основной ИП)

При воздействии δ -функции на входе 2 при низком логическом уровне на входе 1 постоянная времени переходного процесса четырехполосника образованного элементами C' , R' , $C_{пар}$, $G_{пар}$, R_x и C_x при замыкании всех ключей, кроме SA4:

$$\tau = \frac{C'}{G' + G_x + G_{пар}}, \quad (1)$$

где $G' = 1 / R'$, $G_x = 1 / R_x$.

Когда ключи SA3 и SA4 разомкнуты, SA1 и SA2 – замкнуты, на входе 1 присутствует низкий логический уровень, на входе 2 – δ -функция, продолжительность переходного процесса четырехполосника C' , R' , $C_{пар}$

$$\tau' = \frac{C'}{G'}. \quad (2)$$

При разомкнутых ключах SA1, SA4, замкнутых SA2, SA3, и воздействии на входе 1 σ -функции, можно считать VD идеальным ключом. После перепада напряжения с высокого логического уровня на низкий, поведение диода моделируют параметры $C_{пар}$ и $G_{пар}$, и продолжительность переходного процесса

$$\tau'_x = \frac{C_{пар} + C_x}{G' + G_{пар} + G_x}. \quad (3)$$

При тех же положениях ключей SA1, SA2, SA3, но подключении конденсатора C_d (замыкании SA4) продолжительность переходного процесса

$$\tau'_{x2} = \frac{C_{пар} + C_x + C_d}{G' + G_{пар} + G_x}. \quad (4)$$

При размыкании ключа $SA2$ продолжительность переходного процесса

$$\tau_x = \frac{C_{\text{пар}} + C_x + C_d}{G_{\text{пар}} + G_x}. \quad (5)$$

Из (1)...(5) измеряемые параметры:

$$C_x = \frac{\tau'_x \tau' G'}{\tau} - C_{\text{пар}}(T), \quad (6)$$

$$G_x = \frac{\tau'_{x2} G'}{\tau_x - \tau'_{x2}} - G_{\text{пар}}(T). \quad (7)$$

Замена параметров $C_{\text{пар}}$ и $G_{\text{пар}}$ функциями температуры T обусловлена, главным образом, гипотетической зависимостью от температуры емкости $p-n$ перехода обратно смещенного диода VD , а также входной емкости ОУ, и тока утечки VD .

В ходе исследований [1, 9-11] была синтезирована электрическая схема РАП (рисунок 6), ФИСТ – формирователь искусственной средней точки. Транзистор VT выполняет роль электронного ключа, управляющего зарядом измеряемого двухполюсника $C_x R_x$, шунтирующих его начальных емкости C_0 и сопротивления R_0 , конденсатора C_m . Измеряемая емкость вычисляется по формуле [1]:

$$C_x = \frac{T'_m T' - T_m T}{a R_0 (T_m - T')}, \quad (8)$$

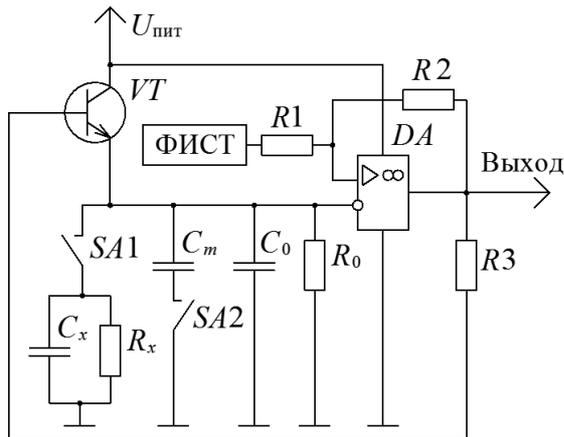


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема РАП

где T , T' , T_m , T'_m – периоды следования импульсов РАП с разомкнутыми ключами $SA1$ и $SA2$, с замкнутым ключом $SA1$, с замкнутыми ключами $SA1$ и $SA2$, с замкнутым $SA2$ и разомкнутым $SA1$ соответственно. Измеряемая емкость (8) определяется с учетом изменения значений емкостей, входящих в состав РАП, под воздействием температуры окружающей среды, поскольку их изменение ведет к изменению периода колебаний РАП.

Исследования конструкций ПИП [15, 18] показали, что наилучшую точность и воспроизводимость результатов измерений обеспечивает трехэлектродная коаксиальная система с охранном эквипотенциальным электродом 1 (рисунок 7), исключающим влияние непостоянства уровня заполнения рабочего объема. Для уменьшения собственных неизменяемой емкости и проводимости датчика был

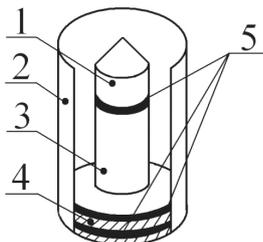


Рисунок 7 – Конструкция ПИП

введен дополнительный разделяющий эквипотенциальный электрод 4 между измерительным 3 и общим 2 в той части конструкции, которая не входит в измерительный объем [15]. Тем самым удалось добиться повышения чувствительности и стабильности выходных параметров ПИП. Позиция 5 на рисунке 7 – диэлектрические прокладки. Функцию электри-

ческой развязки измерительного электрода от охранного и разделительного выполняет повторитель напряжения на операционном усилителе.

В четвертой главе приведены результаты исследования релаксационных измерительных преобразователей и определенных с их помощью релаксационных электрических характеристик (РЭХ) свежих и эксплуатируемых ММ.

Зависимости $C_{\text{пар}}$ и $G_{\text{пар}}$ от температуры T из (6) и (7) определялись как показания изготовленного макета в ходе его функционирования при отключенном ПИП ($C_x = 0$, $G_x = 0$) и подключенном кабеле (рисунок 5). Было установлено [6], что в интервале рабочих температур $G_{\text{пар}} = 0$, $C_{\text{пар}}(T)$ аппроксимируется методом наименьших квадратов линейной функцией (рисунок 8):

$$C_{\text{пар}}(T) = 0.37 \cdot 10^{-13} T + 40.45 \cdot 10^{-12} \quad (9)$$

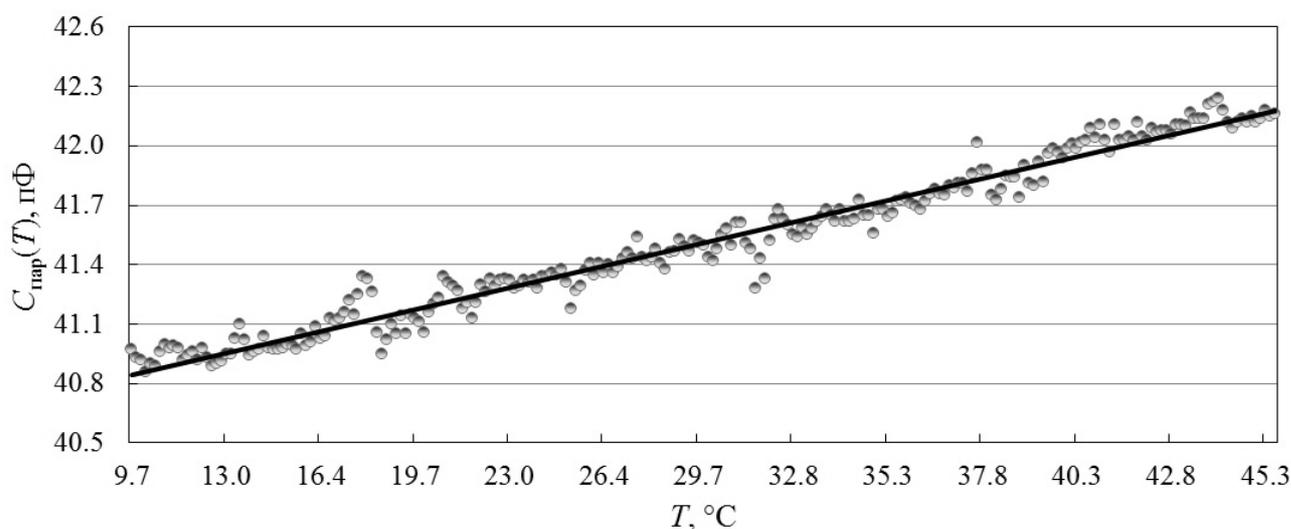


Рисунок 8 – Экспериментальные данные $C_{\text{пар}}(T)$ и аппроксимирующая их функция

С учетом (9) была детерминирована математическая модель измеряемых параметров (6) и (7):

$$C_x = \frac{\tau'_x \tau'}{\tau R'} - 0.37 \cdot 10^{-13} T - 40.45 \cdot 10^{-12}, \quad (10)$$

$$R_x = \frac{(\tau_x - \tau'_{x2}) R'}{\tau'_{x2}}. \quad (11)$$

При определении метрологических характеристик разработанных измерительных преобразователей (таблица 1) использовался набор образцовых двухполюсников на основе конденсаторов и резисторов.

Таблица 1 – Метрологические характеристики разработанных ИП

ИП	Измеряемая емкость, пФ	Шунтирующие сопротивления	δC , %	Измеряемое сопротивление	δR , %	Время измерения, с
Основной ИП	[15...500]	[2...10] МОм	2	[2...10] МОм	4.5	1.00...1.01
		[0.01...10] ГОм	1	[0.01...10] ГОм	1	1.01...12.02
РАП	[106...500]	(1...1100) кОм	4.4	–	–	0.7
ЦИС	–	–	–	(1...1100) кОм	4	0.007...0.660

Анализ РЭХ масел показал, что емкость растет с течением времени и стремится к предельному значению (рисунки 9-11), что объясняется поляризацией составляющих компонентов масла и возникновением внутреннего электростатического поля в исследуемом образце.

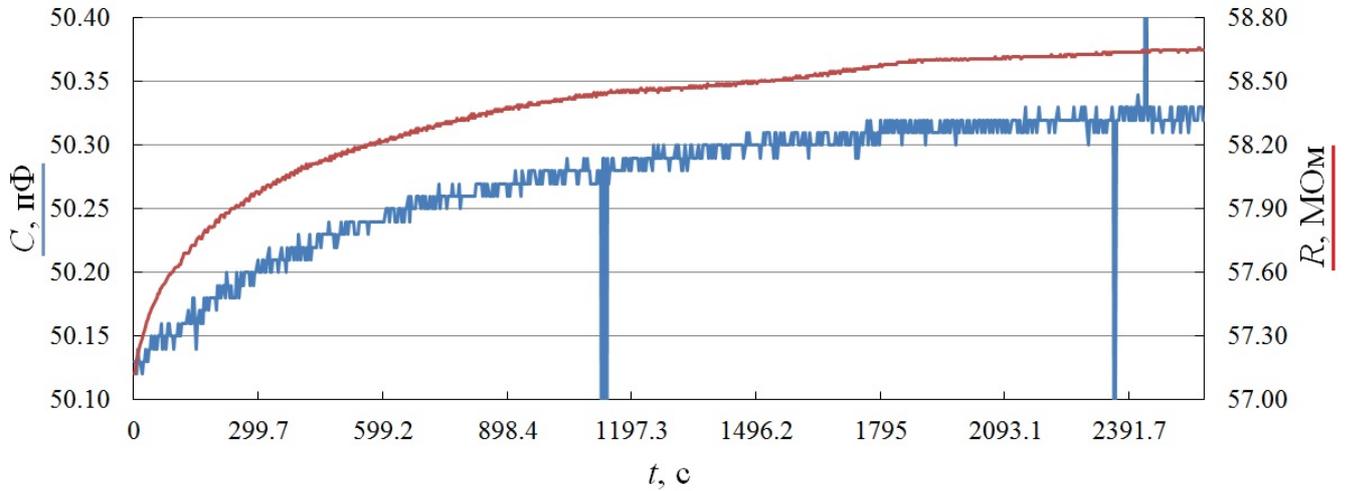


Рисунок 9 – РЭХ свежего MM M-8V 20W-20

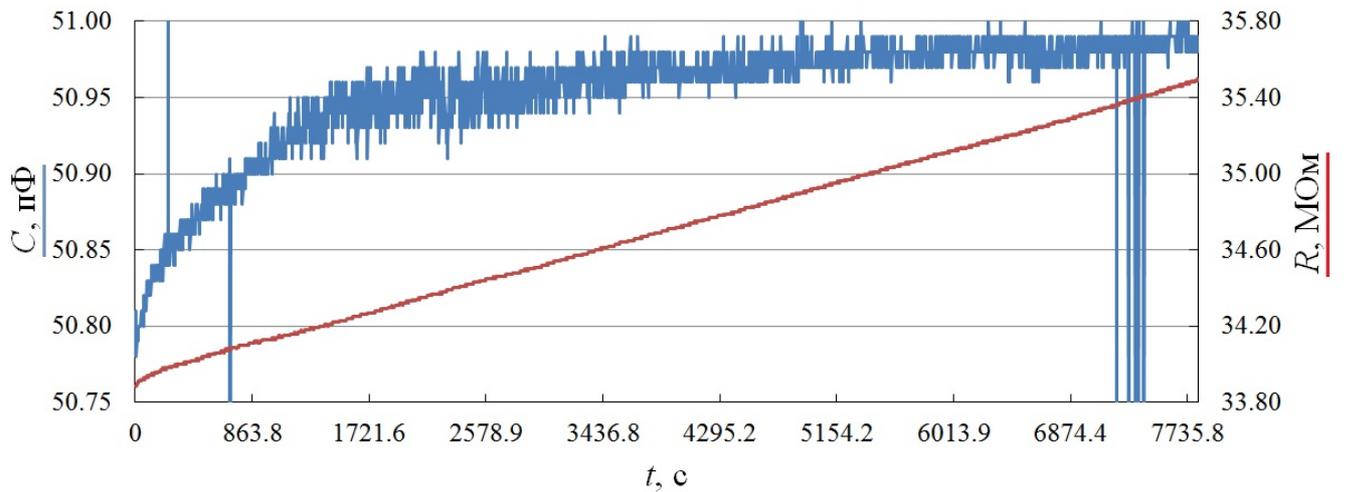


Рисунок 10 – РЭХ свежего MM SUPREMA FORMULA GT 10W-40 TS

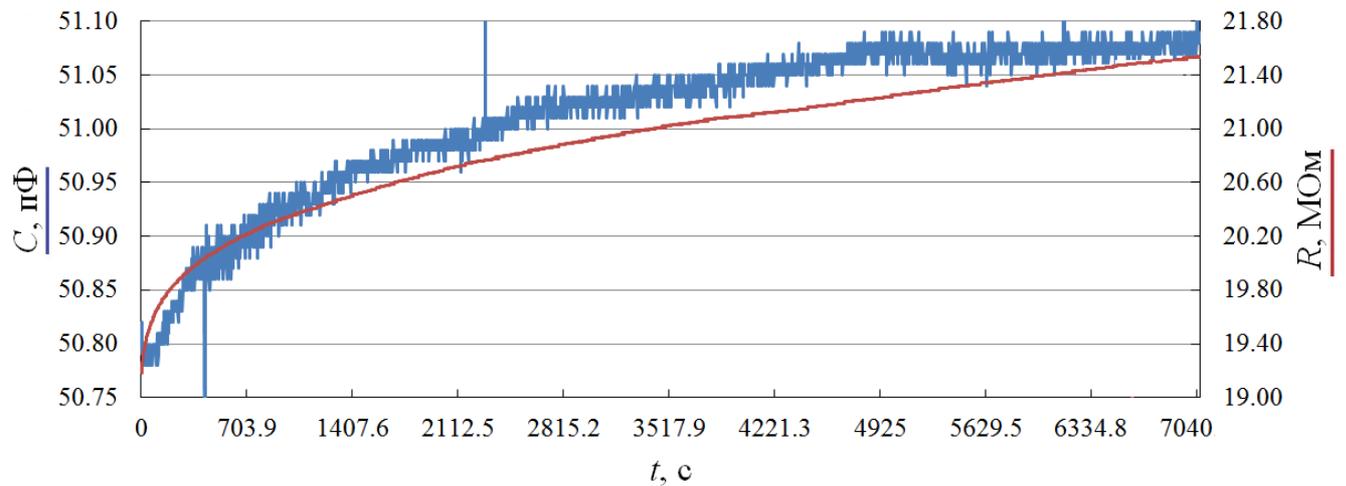


Рисунок 11 – РЭХ свежего MM SUPREMA SYNTH RS 5W-40

Сопротивление при этом неограниченно растет, что более ярко выражено у исследованных полусинтетических и синтетических образцов (рисунки 10, 11, соответственно) и менее – у минеральных (рисунок 9). У всех образцов исследованных масел наблюдалось смещение характеристик вверх относительно начальных значений при введении их в эксплуатацию в ДВС, при этом выявленное поведение кривых существенно не изменяется. Поэтому для экспрессного анализа, как в работах [2, 16], можно использовать несколько первых измеренных значений электрических емкости и сопротивления.

На рисунке 12 приведены зависимости релаксационных электрических сопротивления и емкости ММ от количества содержания загрязняющих примесей [17]. Для снятия зависимостей в ходе эксперимента использовалось свежее ММ *SUPREMA FORMULA GT 10W-40 TS*, а также отработавшее 12000 км ММ этой же марки. Различные концентрации загрязненности были получены в результате смешения свежего и отработавшего ММ. Величина W/W_0 , отложенная по оси абсцисс (рисунок 12), отражает загрязненность смеси относительно загрязненности отработавшего ММ.

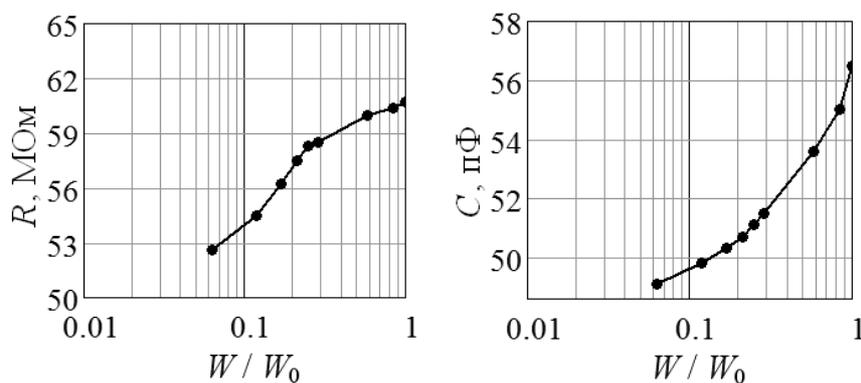


Рисунок 12 – Зависимости релаксационных электрических сопротивления и емкости ММ от количества загрязняющих примесей

Рост сопротивления (рисунок 12) служит фактом уменьшения концентрации моющих и диспергирующих присадок в процессе эксплуатации, которые носят ионный характер. Так же увеличение сопротивления можно трактовать как увеличение числа макровключений – частиц загрязнений, находящихся во взвешенном состоянии с одноименными зарядами на поверхности раздела фаз – молионов. С увеличением продолжительности работы ММ возрастает количество молионов и время их релаксации по сравнению с временами релаксации молекул и ионов свежего масла, что приводит к увеличению измеренной постоянной времени переходного процесса. Емкость возрастает как следствие повышения относительной диэлектрической проницаемости ϵ , что обуславливается присутствием в отработавшем ММ металлических включений, золы, образующейся при сгорании детергентов и других загрязнений, не вносящих, однако, вклада в проводимость, так как они находятся во взвешенном состоянии вследствие действия дисперсантов.

Наличие загрязнений в виде макровключений объясняет и увеличение предельного значения характеристики емкости, крутизны характеристики сопротивления и времени релаксации эксплуатируемого масла по сравнению со свежим, что было выявлено в ходе экспериментов. Для сравнения с характеристиками свежего ММ *SUPREMA SYNTH RS 5W-40* (рисунок 11) на рисунке 13 приведены характеристики этого ММ после 3000 км пробега.

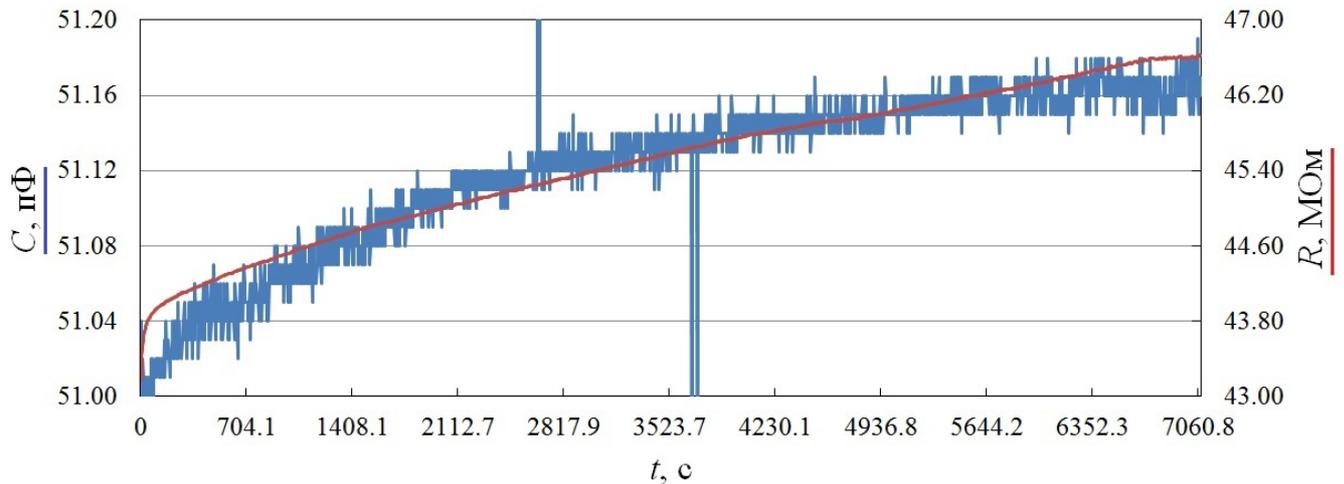


Рисунок 13 – РЭХ эксплуатируемого MM SUPREMA SYNTH RS 5W-40

На основе динамики изменения РЭХ эксплуатируемых масел относительно свежих был разработан способ определения эксплуатационных характеристик масел на основе сравнения изменений трех параметров – предельного значения $C_{пр}$ характеристики емкости, крутизны $S_R = dR/dt$ характеристики сопротивления и времени релаксации $\tau = t(C_0 + \Delta C / \sqrt{2})$, где C_0 – начальное значение характеристики емкости, $\Delta C = C_{пр} - C_0$. Таким образом, способ потребует технически реализовать измерение требуемых величин, сформировать базы данных для конкретных марок MM и позволит реализовать трехпараметровый эксплуатационный контроль.

Для изучения влияния воды в составе работающего MM на его релаксационные электрические характеристики были приготовлены композиции вода-масло с разной массовой долей W дистиллированной воды. В качестве масла было использовано отработавшее SUPREMA FORMULA GT 10W-40 TS с «пробегом» 8000 км. Наблюдается повышение емкости (рисунок 14, б) при образовании эмульсии воды в масле. Увеличение сопротивления (рисунок 14, а) можно объяснить тем, что присутствие воды, находящейся в диспергированном состоянии, ведет к увеличению общего количества молекул смеси. Как следствие, увеличивается длительность переходного процесса при измерительном преобразовании. Снижение

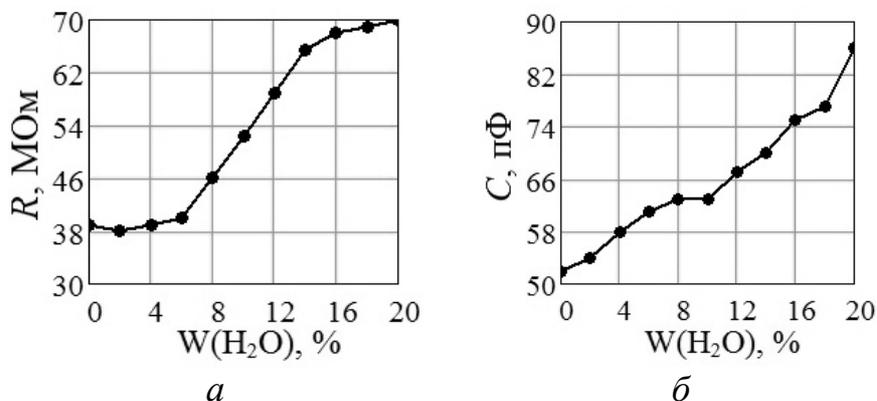


Рисунок 14 – Зависимости релаксационных электрических сопротивления (а) и емкости (б) композиции вода-масло от массовой доли воды

скорости роста сопротивления, наблюдаемое в проведенном эксперименте при достижении $W(\text{H}_2\text{O}) \approx 14\%$, можно трактовать как начало вырождения диспергированной воды в дисперсионную среду и, при дальнейшем увеличении $W(\text{H}_2\text{O})$, образованием эмульсии масла в воде,

что сопровождается увеличением электрической проводимости смеси.

На рисунке 15 приведены результаты исследования влияния температуры на релаксационные электрические сопротивление и емкость ММ: 1 – *SUPREMA FORMULA GT 10W-40 TS*, эксплуатированного в двигателе автомобиля 12000 км; 2 и 3 – свежие ММ *SUPREMA FORMULA GT 10W-40 TS* из различных партий; 4 – свежее ММ ЛУКОЙЛ СУПЕР 5W-40.

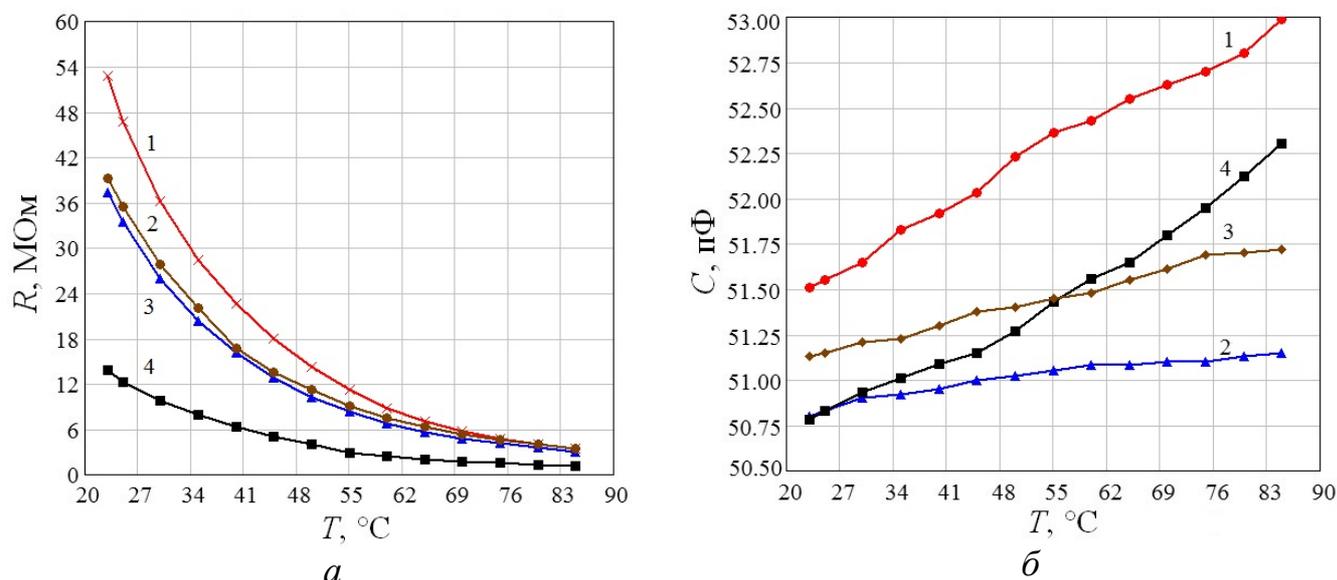


Рисунок 15 – Экспериментальные зависимости релаксационных электрических сопротивления (*a*) и емкости (*б*) от температуры для различных ММ

В интервале температур ММ, находящемся ниже рабочего теплового режима двигателя, возможна однозначная интерпретация состояния ММ по изменению значения релаксационного электрического сопротивления, что обеспечивается стабильностью и предсказуемостью тепловых характеристик этого параметра (рисунок 15, *a*) [3]. Релаксационная электрическая емкость ММ может служить параметром, который повышает информативность и снижает вероятность ошибок при оценке состояния ММ в этом температурном диапазоне. Таким образом, определение кондиционности ММ целесообразно производить в два этапа: на стадии прогрева двигателя при фиксированном значении температуры t_0 , находящейся в интервале от 20 до 50 °С, и в рабочем тепловом режиме двигателя при температуре t_p .

На основе выявленных закономерностей разработан способ контроля состояния моторных масел в процессе эксплуатации [4], заключающийся в двухэтапном (при температурах t_0 и t_p) определении степени деструктуризации масла по относительным изменениям релаксационных электрических параметров масла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты.

1 Разработана усовершенствованная методика проведения измерений составляющих комплексного сопротивления резистивно-емкостных двухполюсни-

ков с применением измерителя добротности, обеспечивающая повышение разрешающей способности по составляющим комплексного сопротивления эквивалентных RC -двухполосников, и позволяющая производить оценку диэлектрических характеристик моторных масел в диапазоне частот [56.23...3000] кГц.

2 Разработан способ измерения активного сопротивления резистивно-емкостного двухполосника инвариантно емкости, который был положен в основу построения измерительных преобразователей параметров резистивно-емкостных двухполосников с расширенными диапазонами преобразования, повышенной точностью и инвариантностью по каналам измерения. Относительные погрешности измерений по каналу емкости в диапазоне [15...500] пФ и сопротивления в диапазоне [0.01...10] ГОм не превысили 1 %, взаимное влияние каналов измерений в указанных диапазонах не вышло за пределы относительной погрешности. Относительные стандартные отклонения составили: 0.013 % по каналу емкости и 0.087 % по каналу сопротивления.

3 Создан аппаратно-программный комплекс определения релаксационных электрических характеристик моторных масел с дополнительными информационными каналами по времени и температуре, позволяющий исследовать поляризационные процессы. Исследованы релаксационные электрические характеристики минеральных, синтетических и полусинтетических моторных масел, выявлено увеличение электрических емкости, сопротивления и времени релаксации в зависимости от степени загрязненности. Полученные данные согласуются с фактом «вымывания» присадок в процессе эксплуатации и образованием в структуре масел макрочастиц загрязнений с одноименным зарядом на поверхности раздела фаз. На основе экспериментальных данных разработан трехпараметровый способ контроля эксплуатационных характеристик моторных масел в состоянии покоя по изменению динамики релаксационных электрических характеристик: изменениям предельного значения характеристики емкости, крутизны характеристики сопротивления и времени релаксации.

4 Разработан способ двухэтапного мониторинга состояния масла в процессе эксплуатации по относительным изменениям релаксационных электрических характеристик – во время прогрева двигателя в диапазоне температур до значения (40...60) °С и при его рабочей температуре.

Перспектива развития темы заключается в более широком и детальном изучении релаксационных электрических характеристик, выявлении корреляции их с качественными характеристиками моторных масел при возможной оптимизации разработанных измерительных преобразователей. Накопление статистического материала при расширении ассортимента исследуемых образцов позволит сформировать теоретические положения о связи механизмов поляризации со структурой и составом как свежих, так и эксплуатируемых моторных масел, а также разработать методы их идентификации по диэлектрическим характеристикам во временной области.

Также можно отметить, что область применения разработанных средств измерений для оценки качественных и количественных характеристик не ограничивается только моторными маслами и может охватывать масла различного генезиса, например, растительные, как показали проведенные исследования [5, 19].

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК

1 **Макшаков, Е.Д.** Температурная коррекция в релаксационном автогенераторном измерительном преобразователе / Е.Д. Макшаков // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 3. – С. 110-112.

2 **Макшаков, Е.Д.** Система экспресс-анализа качества моторных масел / Е.Д. Макшаков // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 2. – С. 125-127.

3 **Макшаков, Е.Д.** Мониторинг моторного масла по эквивалентным релаксационным электрическим характеристикам / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 4. – С. 108-110.

4 **Макшаков, Е.Д.** Способ мониторинга моторных масел по эквивалентным релаксационным электрическим характеристикам / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 1. – С. 74-77.

5 **Макшаков, Е.Д.** Применение релаксационного диэлькометрического анализа для моторных и растительных масел / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Естественные и технические науки. – 2017. – №12 (114). – С. 241-244.

6 **Макшаков, Е.Д.** Совершенствование системы измерения релаксационных электрических параметров моторных масел / Е.Д. Макшаков // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – №10. – С. 50-55.

Патенты

7 Патент на изобретение 2461841 РФ, МПК G01R27/02. Устройство измерения активного сопротивления диссипативных *CG*-двухполюсников: № 2011118081/28: заявлено 04.05.2011: опубликовано 20.09.2012 / **Макшаков Е.Д.** – 6 с.: ил.

8 Патент на изобретение 2503020 РФ, МПК G01R27/00. Измеритель параметров *RC*-двухполюсников: № 2012124471/28: заявлено 13.06.2012: опубликовано 27.12.2013 / **Макшаков Е.Д.** – 7 с.: ил.

В других изданиях

9 **Макшаков, Е.Д.** Исследование и разработка макета измерителя составляющих комплексной диэлектрической проницаемости жидких сред / Е.Д. Макшаков // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий: сборник трудов молодых исследователей. – Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 2008. – С. 68-76.

10 **Макшаков, Е.Д.** Измерение параметров диссипативных *CG*-двухполюсников. Часть I / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий: материалы республиканской науч.-методической очно-заочной конф. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2010. – С. 61-70.

11 **Макшаков, Е.Д.** Измерение параметров диссипативных *CG*-двухполюсников. Часть II / Е.Д. Макшаков // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий: материалы республиканской науч.-методической очно-заочной конф. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2010. – С. 70-76.

12 **Макшаков, Е.Д.** Разработка измерителя составляющих комплексной диэлектрической проницаемости неполярных жидких диэлектриков / Е.Д. Макшаков

// Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сборник трудов науч.-техн. конференции факультета «Информатика и вычислительная техника» ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 24-31.

13 **Макшаков, Е.Д.** Релаксационный измеритель проводимости / Е.Д. Макшаков // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – С. 88-91.

14 **Макшаков, Е.Д.** Термокомпенсация в релаксационном измерителе активного сопротивления / Е.Д. Макшаков // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сборник трудов науч.-техн. конф. факультета «Информатика и вычислительная техника» ИжГТУ. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – С. 186-189.

15 **Макшаков, Е.Д.** Емкостный первичный измерительный преобразователь для сыпучих и жидких материалов / Е.Д. Макшаков // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий: материалы республиканской науч.-методической очно-заочной конф. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2011. – С. 34-36.

16 **Макшаков, Е.Д.** О возможности прогнозирования срока замены моторного масла в двигателе внутреннего сгорания с помощью релаксационного диэлектрического анализа / Е.Д. Макшаков // Институциональное и информационно-техническое обеспечение инновационных технологий: региональная научно-методическая конференция. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2014. – С. 96-101.

17 **Макшаков, Е.Д.** Контроль загрязненности моторного масла по его эквивалентным релаксационным электрическим характеристикам / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Институциональное и информационно-техническое обеспечение инновационных технологий: региональная научно-методическая конференция. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2014. – С. 101-104.

18 Гудин, А.М. Разработка системы формирования измерительной информации о состоянии моторного масла в двигателе в процессе эксплуатации / А.М. Гудин, **Е.Д. Макшаков** // Институциональное и информационно-техническое обеспечение инновационных технологий: региональная научно-методическая конференция. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2014. – С. 140-146.

19 **Макшаков, Е.Д.** Идентификация растительных масел по эквивалентным релаксационным электрическим характеристикам / Е.Д. Макшаков, Ю.Г. Подкин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12-3(54). – С. 122-124.

20 **Макшаков, Е.Д.** Программно-аппаратный комплекс для исследования поляризационных процессов моторных масел / Е.Д. Макшаков // Актуальные проблемы науки и техники: материалы I Межвузовской научно-технической конференции, с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2020. – С. 216-219.