

На правах,



4845441

Силов Евгений Альбертович

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИМПЕДАНСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ**

Специальность 01.04.01. – Приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1 2 МАЙ 2011

Самара – 2011

Работа выполнена на кафедре электротехники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Скворцов Борис Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Семкин Николай Данилович

доктор технических наук, профессор
Нестеров Владимир Николаевич

Ведущее предприятие : ФГУП «НИИ «Экран» г. Самара.

Защита диссертации состоится 3 июня 2011 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан 29 апреля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., профессор

Шахов В.Г.

Актуальность работы. Детонационная стойкость основных видов углеводородных топлив (бензинов и дизельных топлив) определяет их эффективное сгорание, напрямую связана с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств. Детонационная стойкость характеризуется октановым числом для бензинов и цетановым числом для дизельных топлив. В условиях непрерывного производства необходим оперативный контроль детонационной стойкости, как определяющего показателя качества, так как за время лабораторного анализа может производиться некачественный продукт, который практически бесконтрольно продается. По данным Всероссийского общества прав потребителей почти половина продаваемого в стране топлива фальсифицировано по составу, смешано с тетраэтилсвинцом и другими видами запрещенных добавок.

Создание и внедрение быстродействующих устройств оперативного контроля детонационной стойкости углеводородных топлив позволит предприятиям оптимизировать процесс производства, упорядочить ценообразование и продажу. Кроме классических методов, основанных на сжигании накоплен материал по определению детонационной стойкости моторных топлив косвенными методами, достигнуты успехи в их исследовании, улучшены известные и предложены новые методы анализа – оптические, импедансные, акустические. Несмотря на достаточную известность, далеко не исчерпал себя емкостной метод измерения детонационной стойкости, на основе которого в настоящее время создано два прибора, включенных Государственный реестр приборов России – «АС-98» и «Октаномер СВП – 1.00.000». Преимущества емкостного метода заключается в простоте и надежности датчика, в возможности его установки в технологический поток, в разнообразных вариантах изменения частоты и формы сигналов, методах калибровки и математической обработки.

Целью работы является расширение функциональных возможностей емкостных методов и устройств измерения детонационной стойкости углеводородных топлив.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи

1. Анализ достижений в области разработки и производства устройств измерения детонационной стойкости топлив (ДСТ).
2. Математическое моделирование электрического поля емкостного датчика в углеводородной среде. Определение функции преобразования устройств измерения ДСТ.
3. Экспериментальные исследования, электродинамических параметров автомобильных и дизельных топлив с позиций выявления их взаимосвязей с показателями детонационной стойкости.
4. Разработка алгоритмов, программ, схем и методов обработки сигналов.
5. Метрологический анализ.
6. Разработка конструкций и изготовление устройств на основе микропроцессорной техники.

Работа основывается на работах Ф. Эмме, Ш.Б. Надя, А.А. Гуреева, Б.В. Скворцова, В.Н. Астапова, В.Ф. Николаева, и включает в себя разработку и исследование созданных с участием автора оригинальных устройств контроля ДСТ. В работе основной упор делается на создание устройств контроля октанового числа бензинов, цетанового числа дизельных топлив. Наряду с этим рассмотрены информационно-метрологические характеристики устройств, а также варианты их

практического применения. Работа является результатом исследований, проведенных автором по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2011), а также по государственному контракту с Фондом содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере, и в научно-исследовательской лаборатории «Аналитические приборы и системы» СГАУ.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались методы дифференциального исчисления, уравнения в частных производных, теория погрешностей, регрессивного анализа, физика электродинамических процессов, элементы численного и статистического моделирования. При проведении расчетов на ЭВМ использовался математический пакет Mathcad.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель электрического поля емкостного датчика в углеводородной среде с учетом неоднородности диэлектрической проницаемости и проводимости контролируемой среды и компонентов датчика.

2. Разработан алгоритм статистического моделирования компонентного состава топлив и его взаимосвязей с электрическими параметрами.

3. Выявлены взаимосвязи электрических параметров углеводородных топлив в широком диапазоне частот. Получены аналитические выражения, связывающие показатели детонационной стойкости с электрическими параметрами топлив, на основе которых создан прибор для измерения детонационной стойкости топлив.

4. Разработан новый нормативный параметр – комплексный детонационный индекс, как показатель качества углеводородных топлив.

Практическую ценность работы составляют:

1. Схемы и конструкции устройств контроля ДСТ.

2. Программы испытаний, аттестации и поверки разработанных устройств.

3. Созданный действующий образец устройства контроля детонационной стойкости бензинов и дизельных топлив «ИДС - 110».

4. Методики расчетов конструктивных параметров и погрешностей, рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик емкостных устройств контроля ДСТ.

Реализация результатов работы осуществлена путем использования опытных образцов устройства «ИДС-110» в научно-исследовательской лаборатории «Аналитические приборы и системы» СГАУ, в научно-технической фирме «АПС», где применяются для анализа нефтепродуктов. Результаты работы используются также в учебном процессе СГАУ при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также при чтении лекций по курсам, связанным с датчиками и элементами автоматике.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическое описание электрического поля датчика в углеводородной среде с учетом неоднородности электрических параметров контролируемой среды и компонентов датчика.

2. Алгоритм и программа статистического моделирования компонентного состава топлив и его взаимосвязей с электрическими параметрами топлив.

3. Аналитические выражения, связывающие показатели детонационной стойкости топлив с электрическими параметрами. Формулы взаимосвязи электродинамических параметров углеводородной среды в частотной области.

4. Структурные схемы и алгоритмы обработки сигналов емкостных устройств измерения ДСТ.

5. Комплексный детонационный индекс, как новый нормативный показатель качества углеводородных топлив.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных научно-технических конференциях «Мавлютовские чтения», Уфа, 2009г., «Королевские чтения» Самара 2009г.; на Молодежном научно-инновационном конкурсе-конференции «Электроника-2007», в Москве. Разработанный в диссертации прибор ИДС - 110 экспонировался на 16-й международной выставке «Энергетика» в г. Самаре, в 2010г., где отмечен дипломом.

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 10 печатных работ, из которых 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 свидетельства на полезную модель.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 180 страницах текста, рисунков на 43 страницах, 32 таблицы. Список литературы состоит из 89 наименований, 3 приложения на страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследований, дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе дан анализ углеводородных моторных топлив, как объекта исследований с позиций решения поставленных задач. Отмечено, что из 15 основных паспортных показателей качества топлив определяющим, интегральным показателем является детонационная стойкость, характеризующиеся октановым числом (для бензинов) и цетановым числом (для дизельных топлив). Определение детонационной стойкости по стандартизированным методикам осуществляют на специальных установках, сжигающих топливо. Выявлены диапазоны изменений контролируемых параметров различных топлив.

Приведены электрофизические параметры рассматриваемых топлив и известные автору формулы и таблицы их взаимосвязей с показателями ДСТ. Сформулированы эксплуатационно-метрологические требования к проектируемым устройствам, погрешность которых не должна превышать 1,0 % в диапазоне температур 5 - 35 град. С, время измерения не более 10 сек.

Дана классификация, обзор и сравнительная характеристика методов и устройств измерения ДСТ. Отмечено, что основной недостаток указанных приборов – сложность калибровки и невозможность выявления не рекомендованных антидетонационных присадок. За основу работы взята известная зависимость диэлектрической проницаемости, а также проводимости топлив от показателей детонационной стойкости. Достижение поставленной цели требует более глубокого исследования импедансных характеристик топлив в частотном диапазоне.

Во второй главе рассмотрена математическая модель коаксиального конденсатора, помещенного в углеводородную среду, налитую в диэлектрический сосуд, с учетом полей рассеяния, неоднородности диэлектрической проницаемости и проводимости всей системы в целом. Необходимость такого подхода обусловлена соизмеримостью диэлектрических проницаемостей ϵ и проводимостей σ нефтепродукта ($\epsilon = 1,8 \div 2,5$), материала сосуда ($\epsilon = 2 \div 5$) и окружающего воздуха

($\varepsilon = 1, 0$). По вертикальному срезу датчика задача симметрична, что позволяет ограничиться двумерной математической моделью, которая имеет вид:

$$\operatorname{div} \left[\sigma(x, z) \operatorname{grad} U(x, z) \right] = \frac{G + j\omega C}{V} U_{m, z} \partial z \sigma(x, z) = \sigma(x, z) + j\omega \varepsilon(x, z), \quad (1)$$

где $U(x, z)$, $\varepsilon(x, z)$, $\sigma(x, z)$ – потенциал, диэлектрическая проницаемость и проводимость каждой точки поля внутри конденсатора и вокруг него; G , C – полная проводимость и емкость конденсатора, V – объем питающих электродов.

Целью расчетов является определение полной проводимости G и полной емкости C конденсатора и определение влияния на них диэлектрической проницаемости $\varepsilon(x, y, z)$ и проводимости $\sigma(x, y, z)$ контролируемой среды, а также конструктивных размеров конденсатора и сосуда.

Решение проводится методом конечных разностей. Для этого задается прямоугольной областью вокруг рассматриваемой плоской системы, считая ее неоднородной, имеющей проводимость $\sigma(x, z)$ и диэлектрическую проницаемость $\varepsilon(x, z)$ в каждой точке. При таком подходе расчет сводится к решению задачи расчета поля в тонких неоднородных пленках с граничными условиями Дирихле, задающими потенциалы поля на его границах и внутренних точках. Применен метод последовательных итераций. Разработан подробный алгоритм решения. Рассмотрены параметры углеводородных сред в широком диапазоне частот. Комплексная диэлектрическая проницаемость $\hat{\varepsilon} = \varepsilon - j\varepsilon'$ топлив зависит от частоты, причем тангенс угла потерь определяется по формуле: $\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$.

Действительная часть ε фактически не изменяется вплоть до частот 10^8 Гц. Максимальная величина диэлектрической проницаемости ε достигается при $\omega = 0$. Это значение ε называют квазистатическим $\varepsilon(0)$. Для зависимостей проводимости, диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь получены следующие соотношения.

$$\varepsilon(\omega) = \frac{\varepsilon(\infty)\omega^2 + \varepsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} = \frac{n^2\omega^2 + \varepsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2}, \quad (2)$$

где $n^2 = \varepsilon(\infty)$ – коэффициент оптического преломления, определяемый на длине волны $\lambda = 0,586$ мкм, $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$ – критическая частота, τ – постоянная времени

релаксации углеводородной среды.

$$\sigma(\omega) = \sigma(0) \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0^3 \omega^2 \varepsilon_0 [\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)^2}. \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \frac{\{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)\sigma(0) + \varepsilon_0 \omega_0 \omega^2 [\varepsilon(0) - n^2]\} \omega_0^2}{\varepsilon_0 \omega [\omega^2 n^2 + \omega_0^2 \varepsilon(0)] (\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (4)$$

Пример зависимости проводимости и тангенса угла потерь от частоты при различных начальных проводимостях $\sigma(0)$ показан на рисунках 1, 2.

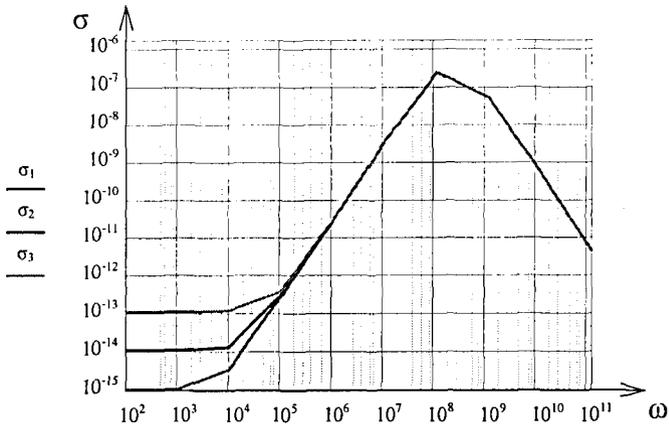


Рисунок 1 - Общий вид зависимости проводимости нефтепродуктов от частоты

Конкретные числовые значения при вычислениях взяты для изооктана – эталонного компонента бензина: $\varepsilon(0) = 1,961$; $n^2 = \varepsilon(\infty) = 1,958$; $\omega_0 = 0,204 \cdot 10^9$ 1/сек ($\tau = 4,9 \cdot 10^{-9}$ сек). У других основных компонентов бензинов эти значения близки к указанным. Для нефтепродуктов такая зависимость получена впервые.

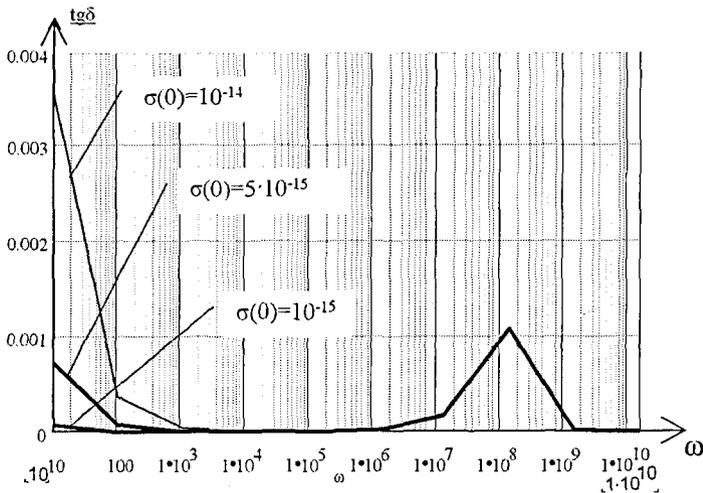


Рисунок 2 - Зависимость тангенса угла потерь нефтепродуктов от частоты при различной статической проводимости

Проводимость готовых товарных автомобильных бензинов, измеренная на частотах 100 – 1000 Гц при температуре 20 °С составляет $(3 \div 10) \times 10^{-16}$ [Ом⁻¹ м⁻¹]. С ростом частоты проводимость уменьшается до нуля. Состав топлива и его детонационные свойства влияют на электрические параметры: проводимость σ , критическую частоту ω_0 , квазистатическую $\varepsilon(0)$ и оптическую $\varepsilon(\infty)$ диэлектрические проницаемости. Графики на рисунках 1, 2 позволяют

сориентироваться в ожидаемых значениях указанных параметров при их измерении и выбрать рабочий диапазон частот.

Исследованы зависимости между детонационной стойкостью и электродинамическими параметрами топлив. На основе регрессионного анализа указанных таблиц получена среднестатистическая зависимость октанового числа компонентов бензинов от диэлектрической проницаемости, которая имеет вид:

$$\Omega = -1,922 \cdot 10^4 + 3,755 \cdot 10^4 \varepsilon - 2,741 \cdot 10^4 \varepsilon^2 + 8,874 \cdot 10^3 \varepsilon^3 - 1,072 \cdot 10^3 \varepsilon^4. \quad (5)$$

По составу автомобильные бензины представляют собой смесь компонентов, получаемых в результате различных технологических процессов. В работе приводятся таблицы предельных изменений компонентного состава автомобильных бензинов и их детонационные и электрические характеристики. Нужно октановое число по маркам бензинов достигается за счет случайного сочетания различных компонентов и технологий. Для вычисления диэлектрических проницаемостей товарных бензинов через компонентный состав разработаны алгоритм и программа, основанные на статистических выборках возможных комбинаций компонентного состава и соответствующих им диэлектрических проницаемостей и октановых чисел. Алгоритм приведен в диссертации. Вычислены предельно-возможные и средневзвешенные диапазоны изменения диэлектрических проницаемостей стандартных марок бензинов при наличии различных присадок. Найдена область всех возможных значений диэлектрических проницаемостей для стандартных марок бензинов (рисунок 3).

Среднестатистическая аналитическая зависимость для товарных (стандартных) бензинов, имеет вид (средняя линия на рисунке 3):

$$\Omega = -6,603 \cdot 10^3 + 6,278 \cdot 10^3 \varepsilon - 1,470 \cdot 10^3 \varepsilon^2. \quad (6)$$

Следует отличать зависимость (5), полученную по данным компонентов бензинов в диапазоне октановых чисел $\Omega=0 \div 120$ и соотношение (6), полученное для товарных бензинов в диапазоне $\Omega=78 \div 100$. Указанные зависимости подтверждают друг друга и совпадают в диапазоне $\Omega=78 \div 100$ с погрешностью 10 %.

Аналогичные исследования выявили взаимосвязи цетанового числа и диэлектрической проницаемости дизельных топлив, которые имеют вид:

$$\varepsilon = 3,196 - 0,06 \cdot Z + 1,389 \cdot 10^{-3} Z^2 - 1,097 \cdot 10^{-5} Z^3, \quad (7)$$

$$Z = -1,391 \cdot 10^6 + 1,797 \cdot 10^6 \varepsilon - 7,737 \cdot 10^5 \varepsilon^2 + 1,11 \cdot 10^5 \varepsilon^3. \quad (8)$$

Формулы (6), (8) справедливы в диапазоне цетановых чисел $Z = 37 \div 53$ и отличаются от известных более высокой точностью и методикой получения, так как получены с учетом статистических вариаций компонентного состава. Выявлен диапазон возможных значений цетановых чисел и диэлектрических проницаемостей стандартных дизельных топлив (рисунок 4).

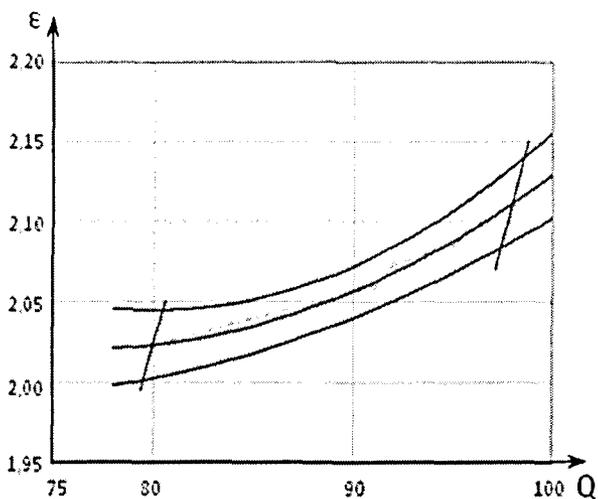


Рисунок 3 - Область возможных значений диэлектрических проницаемостей и октановых чисел стандартных бензинов

Для косвенной оценки топлива без сжигания дано теоретическое обоснование и предложен новый паспортный показатель качества топлива – комплексный электрофизический детонационный индекс (КДИ), косвенно связанный с детонационной стойкостью и подлинностью топлива (наличием в нем компонентов, неразрешенных техническими условиями, в частности неорганических соединений).

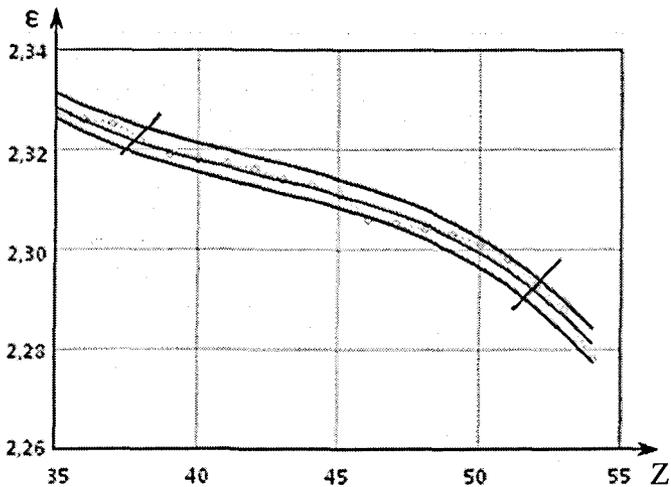


Рисунок 4 - Диапазон возможных значений цетановых чисел и диэлектрических проницаемостей стандартных дизельных топлив

Указанным требованиям удовлетворяет *комплексный детонационный индекс (КДИ), определяемый как отношение комплексных диэлектрических проницаемостей контролируемого и эталонного топлив:*

$$KDI = \frac{\varepsilon(1 - jtg\delta)}{\varepsilon_{\text{эт}}(1 - jtg\delta_{\text{эт}})} = \frac{\varepsilon[(1 + tg\delta tg\delta_{\text{эт}}) + j(tg\delta_{\text{эт}} - tg\delta)]}{\varepsilon_{\text{эт}}(1 + tg^2\delta_{\text{эт}})} = IDS + jINT, \quad (9)$$

где

$$IDS = \frac{\varepsilon(1 + tg\delta tg\delta_{\text{эт}})}{\varepsilon_{\text{эт}}(1 + tg^2\delta_{\text{эт}})} \approx \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{эт}}} \quad (10)$$

индекс детонационной стойкости (действительная часть КДИ),

$$INT = \frac{\varepsilon(tg\delta_{\text{эт}} - tg\delta)}{\varepsilon_{\text{эт}}(1 + tg^2\delta_{\text{эт}})} \quad (11)$$

индекс недоверности топлива (мнимая часть КДИ), $\varepsilon_{\text{эт}}$, ε , $\delta_{\text{эт}}$, δ - диэлектрические проницаемости и углы потерь соответственно эталонного топлива (компонента) и контролируемого топлива. При этом в качестве эталонного компонента для бензинов следует признать толуол, который из всех эталонных жидкостей имеет самые близкие к средним значениям для ароматических углеводородов октановое число $\Omega = 108$, диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 2,362$ и тангенс угла потерь $tg\delta_{\text{эт}} = 122,8 \cdot 10^{-4}$. Контролируемые стандартные бензины, имеющие октановое число меньше 108, будут иметь индекс детонационной стойкости меньше 1 и индекс недоверности близкий к 0, если в них нет неорганических добавок.

В качестве эталонного компонента для дизельных топлив следует принять α -метилнафталин, который при нулевом цетановом числе $Z=0$, имеет максимальную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{\text{эт}} = 2,664$ и близкое к среднему для ароматических углеводородов значение тангенса угла потерь $tg\delta_{\text{эт}} = 165,8 \cdot 10^{-4}$. Стандартные дизельные топлива, имеющие цетановое число больше нуля будут иметь индекс детонационной стойкости меньше единицы и индекс недоверности близкий к нулю, если в них нет неорганических компонентов. Найдено соответствие между октановым числом стандартных бензинов и предложенным индексом детонационной стойкости ИДС, составлены соответствующие графики и таблицы.

На рисунке 5 показан график изменения индекса недоверности топлива от значения тангенса угла потерь. Кривые, соответствующие бензинам, для которых за эталон принят толуол, и дизельным топливам, для которых за эталон принят α -метилнафталин, практически совпадают и отличаются в третьем знаке только при малых углах потерь $tg\delta < 10^{-3}$. График показывает, что индекс недоверности для топлив, имеющих тангенс угла потерь соизмеримый с эталонным топливом практически равен 0 и возрастает до 4% при достижении тангенса угла потерь значения 0,05. Рассмотренные электрофизические параметры топлив IDS и INT наряду с другими параметрами могут использоваться для аттестации топлив. Так как их измерение не требует дорогостоящей аппаратуры, то предложено включение их в паспортные характеристики топлив.

Рассмотрены математические основы совокупно-косвенных измерений детонационной стойкости топлив по комплексной диэлектрической проницаемости. Показатель детонационной стойкости топлив Q связан с комплексной диэлектрической проницаемостью функциональной зависимостью, которую в общем виде можно записать:

$$Q = F(q), \quad (12)$$

где $q = \varepsilon(1 - jtg\delta)$ и функция $F(q)$ в общем случае неизвестна.

Если пренебречь потерями, что можно сделать для стандартных топлив, то показатели детонационной стойкости определяются по выражениям (7), (8). При этом целесообразно откалибровать прибор на топливе с известной детонационной стойкостью. Функцию (12) можно получить экспериментально путем калибровки по нескольким точкам:

$$Q_X = b_0 + b_1 q_X + b_2 q_X^2 + \dots + b_k q_X^k + \dots + b_n q_X^n = \sum_{k=0}^n b_k q_X^k, \quad (13)$$

где $b_k = \frac{\Delta b_k}{\Delta}$,

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & q_0 & q_0^2 & \dots & q_0^k & \dots & q_0^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & q_k & q_k^2 & \dots & q_k^k & \dots & q_k^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & q_n & q_n^2 & \dots & q_n^k & \dots & q_n^n \end{vmatrix}, \quad \Delta b_k = \begin{vmatrix} 1 & q_0 & q_0^2 & \dots & Q_0 & \dots & q_0^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & q_k & q_k^2 & \dots & Q_k & \dots & q_k^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & q_n & q_n^2 & \dots & Q_n & \dots & q_n^n \end{vmatrix}$$

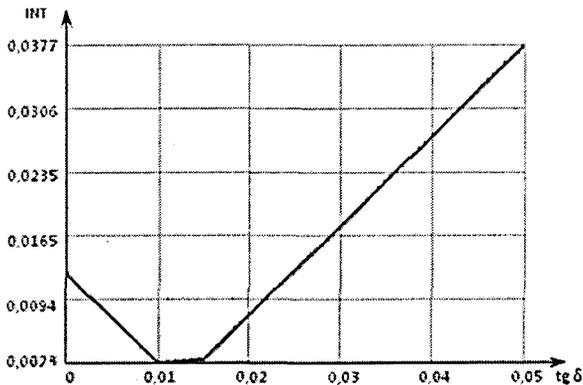


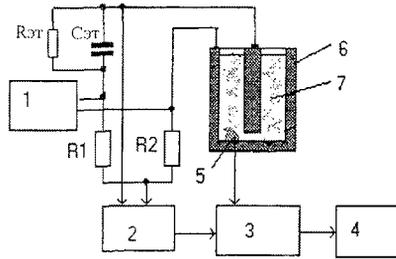
Рисунок 5 - График зависимости индекса недостоверности от тангенса угла потерь

$Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ - показатели детонационной стойкости и соответствующие им диэлектрические проницаемости эталонных топлив.

В третьей главе рассмотрены методы, датчики и схемы емкостных измерений ДСТ. Даны характеристики и схемы измерений для низкочастотных мостовых и резонансных методов, а также метода биений. Эти методы основаны на измерении емкости конденсатора, помещенного в углеводородную среду.

Разработаны две структурные схемы приборов для оперативного контроля показателей ДСТ, а также нормированного индекса детонационной стойкости *NIDS* и индекса недостоверности топлива *INT*. В мостовой схеме, показанной на рисунке 6, защищенной патентом [9], выходной сигнал, снимаемый с диагонали моста, зависящий от детонационной стойкости топлива, через усилитель и АЦП подается на вход микроЭВМ, которая вычисляет величину детонационной стойкости с поправкой на температуру.

В частотной схеме показатель детонационной стойкости топлива, зависящий от диэлектрической проницаемости и индекс подлинности топлива изменяет частоту соответствующих таймеров.



1 – генератор, 2- усилитель, 3 – аналого-цифровой преобразователь,
4 -микроЭВМ, 5 – датчик температуры, 6 – емкостной датчик, 7 – топливо
Рисунок 6 - Мостовой прибор измерения детонационной стойкости топлив

Частотные сигналы подаются в контроллер, который вычисляет показатель детонационной стойкости Q , нормированный индекс детонационной стойкости $NIDS$ и индекс подлинности топлива INT . Показания корректируются в зависимости от сигнала датчика температуры. Прибор легко калибруется, для чего в датчик наливается толуол – для режима измерения детонационных характеристик бензинов или α – метилнафталин – для режима измерения детонационных характеристик дизельных топлив. Калибровочные данные записываются в контроллер и затем используются длительное время до очередной поверки прибора.

В четвертой главе рассмотрены информационно-метрологические характеристики рассматриваемых приборов. Определены основные и дополнительные погрешности. К основным отнесены погрешности калибровочной модели, датчиков, квантования, вычислений, а также шумы. Методическая погрешность, определяется погрешностью эталонов и калибровочных коэффициентов. Процесс определения параметров ДСТ в рассматриваемых устройствах классифицируются как косвенные измерения. Учитывая, что калибровочная модель и измеренная комплексная диэлектрическая проницаемость могут иметь погрешность δb_k и δq_x соответственно, для результирующей абсолютной погрешности измерений можно записать:

$$\delta Q_x = Q_x^p - Q_x = \sum_{k=1}^n k(b_k + \delta b_k)(q_x + \delta q_x)^k - \sum_{k=0}^n b_k q_x^k \quad (14)$$

где Q_x^p - реальное значение показателя ДСТ, q_x – измеренная диэлектрическая проницаемость (емкость датчика или выходная частота датчика), b_k – коэффициенты, определяемые при калибровке по выражению (13).

Общая абсолютная погрешность определения параметра ДСТ δQ_x складывается из погрешности измерения электрофизического параметра δq_x (погрешность датчиков) и погрешности определения калибровочных коэффициентов δb_k (погрешность калибровки). Приведены примеры расчета погрешностей при различных значениях погрешностей эталонов и датчиков. Для время- импульсных измерений показано: для того, чтобы стандартный контроллер с тактовой частотой 4,0 МГц зафиксировал изменения октанового числа на величину 0,5 как минимум двумя тактами необходим датчик с емкостью 40 пФ, шестнадцати - разрядный счетчик , при этом максимальное время измерения составит 16 мсек.

Дополнительные погрешности определяются следующими факторами: изменением температуры контролируемого топлива и окружающей среды; колебаниями питающих напряжений; электромагнитными наводками и помехами, которые могут иметь случайный характер; наличием в топливе примесей, недопустимых по ГОСТ; субъективные погрешности, связанные с действием обслуживающего персонала, в частности с отбором пробы, недоливом и загрязненностью датчика или мерной посуды; инерционностью измерительного процесса (динамические погрешности). Исследованы зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь компонентов топлив и товарных нефтепродуктов от температуры. С ростом температуры диэлектрическая проницаемость ϵ и диэлектрические потери ϵ' жидких нефтепродуктов уменьшаются. Отмечено, что для товарных бензинов в диапазоне $20 \div 30$ °C имеет место максимальная скорость изменения диэлектрической проницаемости от температуры. В диапазоне температур $(-20 \div +50)$ изменение ϵ от температуры описывается аналитической зависимостью:

$$\epsilon = \epsilon_{20}(1.5243 \cdot 10^{-8} \theta^4 - 6.5944 \cdot 10^{-7} \theta^3 - 1.9141 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 1.7365 \cdot 10^{-4} \theta + 1.0207), \quad (15)$$

Следует отметить, что графики изменений диэлектрической проницаемости при охлаждении и нагревании отличаются друг от друга на $10 \div 15$ %, однако общий характер сохраняется. Экспериментальные исследования топлив показали, что удельная температурная погрешность измерения октанового числа бензинов составляет в среднем $\delta \Omega_{\theta} = 0.024$ оч/градC, цетанового числа дизельных топлив $\delta Z_{\theta} = 0.014$ цч/градC, что в ожидаемых условиях эксплуатации требует обязательной корректировки.

Рассмотрены методы повышения точности и стабильности емкостных устройств контроля ДСТ, которые делятся на три группы: конструкционные, программные и комбинированные.

В работе рассмотрены схемы термокомпенсации, применение которых позволили уменьшить температурную погрешность до 0.005 %/град C. Важными факторами повышения точности, стабильности и надежности является: конструктивное совмещение датчиков и контроллера в одном корпусе, что позволяет устранить паразитную емкость соединительных кабелей; организация нескольких калибровочных таблиц с возможностью выбора по регионам; использование энергосберегающей элементной базы; внутрприборное программирование по последовательному порту, что позволяет менять алгоритмы обработки без вскрытия прибора. В приборах заложены технические возможности сохранения нескольких калибровочных таблиц, полученных на разных топливах.

В пятой главе изложены вопросы экспериментального исследования и практического использования разработанных устройств. Изготовлен прибор измерения детонационной стойкости и подлинности топлива «ИДС - 110». Прибор прошел эксплуатационные испытания на нефтезаводе города Кириши. Результаты испытаний продемонстрировали высокие эксплуатационные качества прибора, возможность его использования в бытовых, полевых и производственных условиях.

Технические характеристики прибора ИДС – 110 .

- Диапазон измерения октановых чисел бензинов ... 80,0 – 110
- Диапазон измерения цетановых чисел дизтоплив 40 - 56
- Дискретность измерений 0,1 оч
- Относительная погрешность 0,5 %

- Время измерения 10 сек
- Объем пробы 50 мл
- Индикация.....цифровая (ЖКИ)
- Питание6 В (батарейки)
- Диапазон рабочих температур10 - +35 град С
- Масса 0,6 кг
- Оперативная калибровка может проводиться на эталонных компонентах (толуол, α - метилнафталин) и на товарных топливах.
- Автоматическая самодиагностика, индикация исправности.
- Вывод данных в ЭВМ и на принтер

Прибор внедрен в ООО «АПС», г. Самара, где используется для оперативных исследований зависимости детонационной стойкости топлив от концентрации различных присадок. Результаты теоретических исследований, методы и алгоритмы используются в учебном процессе СГАУ, в исследовательской работе студентов и при дипломном проектировании. Рассмотрены вопросы применения созданного прибора в технологическом процессе компаундирования (смешения) топлив.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации разработана общая теория емкостных методов измерения детонационной стойкости бензинов и дизельных топлив. Дано научное обоснование и создано устройства оперативного контроля показателей ДСТ, нашедшие практическое применение в промышленности, научных исследованиях и учебном процессе. Получены следующие результаты и вывод:

1. Библиографические и патентные исследования, а также сравнительный анализ известных способов измерений и конструкций подтвердил не затухающий рыночный интерес к емкостным методам контроля ДСТ и их достаточные функциональные возможности.
2. Математическая модель датчика в углеводородной среде представляет собой набор уравнений Максвелла, описывающих электрическое поле, определяемое граничными условиями, формой электродов и материалом измерительного сосуда, диэлектрической проницаемостью и проводимостью контролируемой среды. Предложен конечно-разностный алгоритм расчета поля, определяющий общую емкость и проводимость датчика.
3. Диэлектрическая проницаемость и проводимость углеводородных топлив взаимосвязаны, зависят от частоты и имеет область аномальной дисперсии (область критических частот $\omega_0 = 10^7 \div 10^9$ Гц), в которой проводимость и возрастает, имеет максимум на критической частоте, после которой уменьшается до нуля, а диэлектрическая проницаемость уменьшается до значения, равного квадратному корню от статической диэлектрической проницаемости. Критическая частота определяется временем дипольной релаксации полярных молекул в углеводородной среде.
4. Разработан алгоритм и программа статистического анализа компонентного состава стандартных топлив, на основе которой выявлен диапазон возможных значений диэлектрических проницаемостей и соответствующих им октановых чисел бензинов и цетановых чисел дизельных топлив. Полученные аналитические зависимости, связывающие показатели ДСТ и диэлектрическую проницаемость имеют нелинейный характер, причем с ростом диэлектрической проницаемости октановое число бензинов возрастает, а цетановое число дизельных топлив уменьшается.

5. Предложен новый показатель качества топлив – комплексный детонационный индекс, который позволяет оперативно оценивать детонационные свойства топлива и одновременно степень несоответствия стандартному компонентному составу. Разработанная методика совокупно-косвенного измерения по одному параметру позволяет создать математическую модель прибора по калибровочным точкам.

6. Современная элементная база электроники и датчиковой техники позволяет создавать портативные приборы с требуемыми техническими характеристиками и сервисными функциями. Предложенные схемы емкостных приборов измерения показателей детонационной стойкости и подлинности топлив позволяют использовать для калибровки не только вторичные эталоны, проверенные на стандартных моторных установках, но и первичные эталонные компоненты – толуол для бензинов и α -метилнафталин для дизельного топлива.

7. Основная погрешность емкостных приборов контроля ДСТ, складывается из погрешности датчиков и погрешности математической модели, получаемой в процессе калибровки. Для время- импульсных измерений показано: для того, чтобы стандартный контроллер с тактовой частотой $4,0$ МГц зафиксировал изменения октанового числа на величину $0,5$ двумя тактами необходим датчик с емкостью 40 рФ, шестнадцати -разрядный счетчик , при этом максимальное время измерения составит 16 мсек.

8. Дополнительные погрешности в основном определяются колебаниями температуры контролируемой пробы. Удельная температурная погрешность измерения октанового числа бензинов составляет $\delta\Omega_o = 0.024$ оц/градС, цетанового числа дизельных топлив $\delta\Omega_o = 0.014$ цч/градС, что в ожидаемых условиях эксплуатации требует корректировки. Повышение точности связано с конструктивными и программными методами, использование которых уменьшает погрешность до 0.005 %/град С.

9. Исследования электрофизических характеристик топлив подтвердили правильность основных теоретических положений, используемых при проектировании емкостных приборов контроля ДСТ. Созданное устройство контроля ДСТ «ИДС-110» удовлетворяют современным требованиям и может использоваться как в лабораториях, так и в технологической системе производства топлива. Прибор внедрен в ООО «АПС», г.Самара, и в учебный процесс СГАУ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Силов, Е.А. Прибор контроля детонационной стойкости углеводородных топлив [Текст]/Е.А.Силов//Естественные и технические науки. 2010. - №4.
2. Силов, Е.А. Расчет электрического поля емкостного датчика измерения параметров жидких сред [Текст]/Е.А.Силов//Авиакосмическое приборостроение. – 2011. - №1.
3. Скворцов, Б.В., Силов, Е.А. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов» [Текст]/Б.В.Скворцов, Е.А.Силов//Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. - № 5.
4. Скворцов, Б.В., Силов, Е.А., Солнцева, А.В. Статистическое моделирование компонентного состава углеводородных топлив и исследование взаимосвязей детонационной стойкости с их электродинамическими параметрами [Текст]/Б.В.Скворцов, Е.А.Силов, А.В.Солнцева//Вестник СГАУ. – 2010. - №2.
5. Скворцов, Б.В., Силов, Е.А. Показатели детонационной стойкости и достоверности углеводородных топлив и способ их измерения [Текст]/Б.В.Скворцов, Е.А.Силов//Измерительная техника. – 2010. - №6.
6. Силов, Е.А. Метод измерения показателей детонационной стойкости и достоверности углеводородных топлив [Текст]/Е.А.Силов//Сборник докладов всероссийской молодежной научной конференции “Мавлютовские чтения”. – Уфа, 2009. - т.2.
7. Силов, Е.А. Устройство комплексного контроля детонационных характеристик топлива [Текст]/Е.А.Силов//Сборник докладов всероссийской молодежной научно-технической конференции “X Королевские чтения”. - Самара, 2009 г.
8. Максимов, А.Ю., Силов, Е.А. Прибор для измерения уровня жидких углеводородных продуктов и определения их качественных характеристик с помощью импульсов пикосекундного диапазона [Текст]/А.Ю.Максимов, Е.А.Силов//Сборник докладов всероссийского молодежного научно-инновационного конкурса – конференции «Электроника – 2007». - Москва, 2007 г.
9. Скворцов, Б.В., Борминский, С.А. Максимов, А.Ю. Силов, Е.А. Устройство оперативного контроля показателей детонационной стойкости углеводородных топлив [Текст]/Б.В.Скворцов, С.А.Борминский, А.Ю.Максимов, Е.А.Силов//Свидетельство на полезную модель №91175, б.и. № 3, 2010 г.
10. Скворцов, Б.В., Борминский, С.А. Максимов, А.Ю. Силов, Е.А. Устройство измерения уровня и показателей качества жидких энергоносителей [Текст]/Б.В.Скворцов, С.А.Борминский, А.Ю.Максимов, Е.А.Силов//Свидетельство на полезную модель № 78308 б.и. №8, 2008г.

Подписано в печать 26.04.11 . Тираж 100 экз.
Отпеч. с готовых оригинал-макетов заказчика
СГАУ, г. Самара, Московское шоссе 34