

*На правах рукописи*

Васильев Игорь Растиславович

**ЕМКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ  
ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ**

Специальность 05.13.05. – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2007

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Скворцов Б.В.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Матюнин С.А.

Кандидат технических наук, доцент Куляс М.О.

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

Защита диссертации состоится 28 мая в 13 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.05 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан 25 апреля 2007 г.

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

 А.А. Калентьев

**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. Оперативный контроль детонационной стойкости углеводородных топлив нужен производителям, продавцам и покупателям. Детонационная стойкость характеризуется октановым числом для бензинов и цетановым числом для дизельных топлив. В условиях непрерывного производства необходим непрерывный 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.

В настоящее время на всех заводах России контроль детонационной стойкости производится путем сжигания с дальнейшим анализом продуктов сгорания. Такой метод не пригоден для технологического контроля нефтепродуктов в процессе производства и тем более для бортовых систем контроля подвижных объектов. Создание и внедрение быстродействующих приборов 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 повышение точности и 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 приборов измерения детонационной стойкости топлив (ДСТ).
2. Математическое моделирование электрического поля емкостного датчика в углеводородной среде. Разработка математической модели процесса 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 прибора 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 приборов, а также варианты их практического применения, в том числе как элементов систем управления технологическим процессом.

Работа является результатом исследований, проведенных автором по программе «Инновационная деятельность высшей школы», а также по договору Межрегиональной научно-внедренческой фирмой КИМОНО в научно-исследовательской лаборатории «Аналитические приборы и системы» Самарского государственного аэрокосмического университета и в заводских лабораториях Киришского нефтезавода.

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

**Научная новизна** работы заключается:

1. В математическом моделировании электрического поля емкостного датчика в углеводородной среде с учетом неоднородности диэлектрической проницаемости и проводимости компонентов датчика.
2. В создании алгоритмов статистического моделирования компонентного состава топлив и его взаимосвязей с электрическим параметром.
3. В исследовании электрических параметров топлив, выявлении их взаимосвязей в широком диапазоне частот.
4. В аналитических выражениях, связывающих показатели детонационной стойкости с электрическими параметрами топлив.
5. В создании нового нормативного параметра – комплексного детонационного индекса, как показателя качества углеводородных топлив.

**Практическую ценность работы** составляют:

1. Схемы и конструкции приборов контроля качества топлив.
2. Программы испытаний, аттестации и поверки приборов.
3. Созданный действующий образец прибора контроля детонационной стойкости бензинов и дизельных топлив «ИДС - 110».
4. Методики расчетов конструктивных параметров и погрешностей, рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик емкостных приборов контроля ДСТ.

**Реализация результатов работы** осуществлена путем использования опытных образцов прибора «ИДС-110» в научно – исследовательской лаборатории «Аналитические приборы и системы» СГАУ, научно в научно-технической фирме

«Протон» и Межрегиональной научно-внедренческой фирме «КИМОНО», г. Кириши, 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 автоматики.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Математическое описание электрического поля датчика в углеводородной среде с учетом неоднородности электрических параметров компонентов датчика.
2. Алгоритм и программа статистического моделирования компонентного состава топлив и его взаимосвязей с электрическими параметрами топлив. Аналитические выражения, связывающие показатели детонационной стойкости топлив с электрическими параметрами и взаимосвязь электродинамических параметров углеводородной среды в частотной области.
3. Структурные схемы и алгоритмы обработки сигналов емкостных устройств измерения ДСТ.
4. Комплексный детонационный индекс, как новый нормативный показатель качества углеводородных топлив.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем», Пенза, 1996, 1997 г.г.; на XIV, XV, XVI международных научно-технических конференциях «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления», г. Судак, 2002, 2003, 2004 г.г.; на V Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права», Сочи, 2002. Разработанный в диссертации прибор ИДС - 110 экспонировался на всероссийских и международных выставках в различных городах России, в частности в 2005 г. на Третьей ярмарке бизнес-ангелов и инноваторов Приволжского федерального округа в г. Самаре, где отмечен дипломом.

**Публикации.** По результатам исследований и разработок опубликовано 11 печатных работ, получено 2 патента РФ, 1 свидетельство на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 218 страницах текста, рисунков на 43 страницах, 32 таблицы. Список литературы состоит из 89 наименований, 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. Рассматриваются автомобильные и авиационные бензины, реактивные и дизельные топлива, показаны их номенклатура, фракционный и компонентный состав. 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 гостированным методикам осуществляют на специальных установках УИТ-85 и ИДТ-90, сжигающих топливо. Исследования показали следующие диапазоны изменений контролируемых параметров различных топлив (табл.1).

Таблица 1. Диапазоны изменений показателей детонационной стойкости топлив

Топливо Параметры	Автомобильные бензины	Авиацион. бензины	Дизельные топлива
Октановое число (по исслед. методу)	80 - 98	80 - 120	Не аттестуется
Цетановое число	не аттест.	не аттест.	45 - 52

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. Подробно описаны и даны технические характеристики емкостных приборов – «АК-ЗБ», «Октаномер СВП 1.00.000», «АС-98», «СВП 1.14.212», также оптических приборов аналогичного класса: «ZX – 101» и «ZX – 440». 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. Сформулированы задачи дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

**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  $\epsilon$  и проводимостей  $\sigma$  нефтепродукта ( $\epsilon = 1,8 \div 2,5$ ), материала сосуда ( $\epsilon = 2 \div 5$ ) и окружающего воздуха

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial U}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{GU_0}{V} = A, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial U}{\partial z} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{CU_0}{V} = B, \quad (2)$$

где  $U(x,z)$ ,  $\varepsilon(x,z)$ ,  $\sigma(x,z)$  – потенциал, диэлектрическая проницаемость и проводимость каждой точки поля внутри конденсатора и вокруг него;  $U_0$ ,  $G$ ,  $C$  – напряжение питания, полная проводимость и емкость конденсатора,  $V$  – объем питающих электродов.

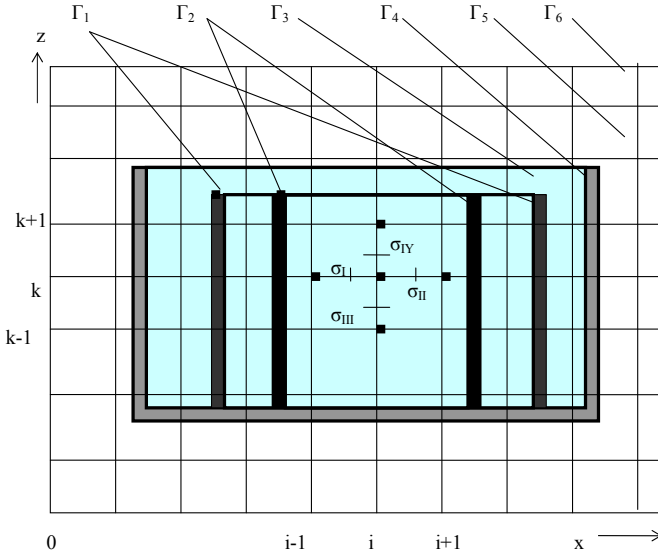


Рис.1. Иллюстрация к математической модели датчика в конечно – разностной форме

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. Заданную область можно считать достаточно удаленной, настолько, что можно принять потенциал на ее границах равным нулю. Влияние размера ограниченной области в последующем можно оценить численным экспериментом. 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:  $U(\Gamma_0) = 0$ ,  $U(\Gamma_1) = 0$ ,  $U(\Gamma_2) = U_0$ . Применен метод последовательных итераций. Разработан

подробный алгоритм решения. Проведены расчеты для стандартных конструкций, результаты которых подтвердились расчетами по аналитическим формулам для стандартных конструкций.

Рассмотрены параметры углеводородных сред в широком диапазоне частот. Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\dot{\epsilon} = \epsilon - j\epsilon'$  топлив зависит от частоты, причем тангенс угла потерь определяется по формуле:  $tg\delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon}$ .

Действительная часть  $\epsilon$  фактически не изменяется вплоть до частот  $10^8$  Гц. Максимальная величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  достигается при  $\omega = 0$ . Это значение  $\epsilon$  называют квазистатическим  $\epsilon(0)$ . С увеличением частоты действительная часть  $\epsilon$  сохраняется на уровне  $\epsilon(0)$  вплоть до области аномальной диэлектрической дисперсии, в которой постепенно уменьшается, спадая до постоянного значения. Для зависимостей проводимости, диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь получены следующие соотношения.

$$\epsilon(\omega) = \frac{\epsilon(\infty)\omega^2 + \epsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} = \frac{n^2\omega^2 + \epsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2}, \quad (3)$$

где  $n^2 = \epsilon(\infty)$  - коэффициент оптического преломления, определяемый на длине волны  $\lambda = 0,586$  мкм,  $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$  - критическая частота,  $\tau$  - постоянная времени релаксации углеводородной среды.

$$\sigma(\omega) = \sigma(0) \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0^3 \omega^2 \epsilon_0 [\epsilon(0) - \epsilon(\infty)]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)^2}. \quad (4)$$

$$tg\delta(\omega) = \frac{\{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)\sigma(0) + \epsilon_0 \omega_0 \omega^2 [\epsilon(0) - n^2]\} \omega_0^2}{\epsilon_0 \omega [\omega^2 n^2 + \omega_0^2 \epsilon(0)] (\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (5)$$

Пример зависимости проводимости и тангенса угла потерь от частоты при различных начальных проводимостях  $\sigma(0)$  показан на рисунках.2, 3.

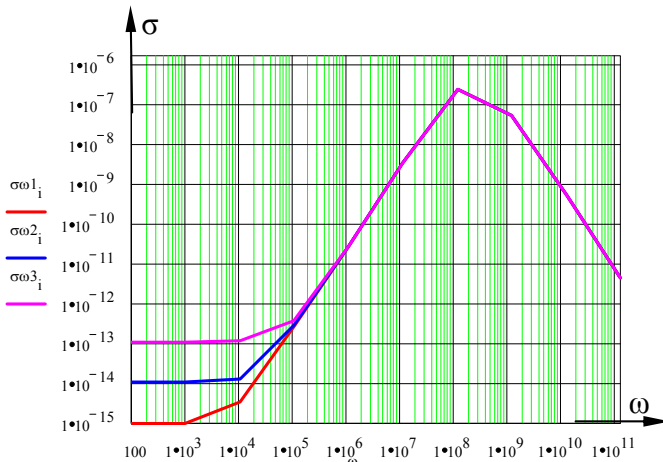


Рис. 2. Общий вид зависимости проводимости нефтепродуктов от частоты



Конкретные числовые значения при вычислениях взяты для изооктана – эталонного компонента бензина:  $\varepsilon(0) = 1,961$ ;  $\varepsilon(\infty) = 1,958$ ;  $\omega_0 = 0,204 \cdot 10^9$  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. График показывает: экстремум проводимости имеет место на критической частоте  $\omega_0$ , при этом начальная проводимость не влияет на величину экстремума.

Проводимость готовых товарных автомобильных бензинов, измеренная на частотах 100 – 1000 Гц при температуре 20 °С составляет  $(3 \div 10) \times 10^{-16}$  [Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>]. С ростом частоты проводимость уменьшается до нуля в соответствии с графиком на рис. 2. Состав топлива и его детонационные свойства влияют на электрические параметры: проводимость  $\sigma$ , критическую частоту  $\omega_0$ , квазистатическую  $\varepsilon(0)$  и оптическую  $\varepsilon(\infty)$  диэлектрические проницаемости. Графики на рисунках 2, 3 позволяют сориентироваться в ожидаемых значениях указанных параметров при их измерении и выбрать рабочий диапазон частот.

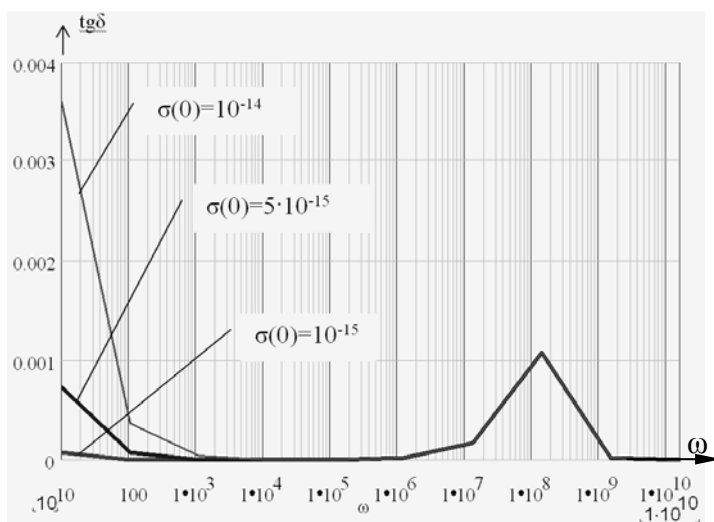


Рис. 3. Зависимость тангенса угла потерь нефтепродуктов от частоты при различной статической проводимости

Исследованы корреляционные зависимости между детонационной стойкостью и электродинамическими параметрами топлив. В работе приведены подробные таблицы диэлектрических проницаемостей, диэлектрических потерь, постоянных времени дипольной релаксации, октановых чисел нефтяных фракций и компонентов углеводородных топлив. На основе регрессионного анализа указанных таблиц получена среднестатистическая зависимость октанового числа компонентов бензинов от диэлектрической проницаемости, которая имеет вид:

$$\Omega = -1,922 \cdot 10^4 + 3,755 \cdot 10^4 \varepsilon - 2,741 \cdot 10^4 \varepsilon^2 + 8,874 \cdot 10^3 \varepsilon^3 - 1,072 \cdot 10^3 \varepsilon^4. \quad (11)$$

По составу автомобильные бензины представляют собой смесь компонентов, получаемых в результате различных технологических процессов. Базовым компонентом для производства товарных бензинов (АИ-80, 91, 92, 95, 98) являются бензины каталитического риформинга и крекинга с добавлением в них высокооктановых присадок алкилбензина, изооктана, изопентана, толуола, метилтретбутилового эфира (МТБЭ). 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. Вычислены предельно-возможные и средне - взвешенные диапазоны изменения диэлектрических проницаемостей стандартных марок бензинов при наличии различных присадок. Найдена область всех возможных значений диэлектрических проницаемостей для стандартных марок бензинов (рис. 4).

Среднестатистическая аналитическая зависимость для товарных (стандартных) бензинов, имеет вид (средняя линия на рис. 4):

$$\varepsilon = 3,179 - 0,03\Omega + 1,977 \cdot 10^{-4} \Omega^2. \quad (12)$$

Полезна также обратная зависимость:

$$\Omega = -6,603 \cdot 10^3 + 6,278 \cdot 10^3 \varepsilon - 1,470 \cdot 10^3 \varepsilon^2. \quad (13)$$

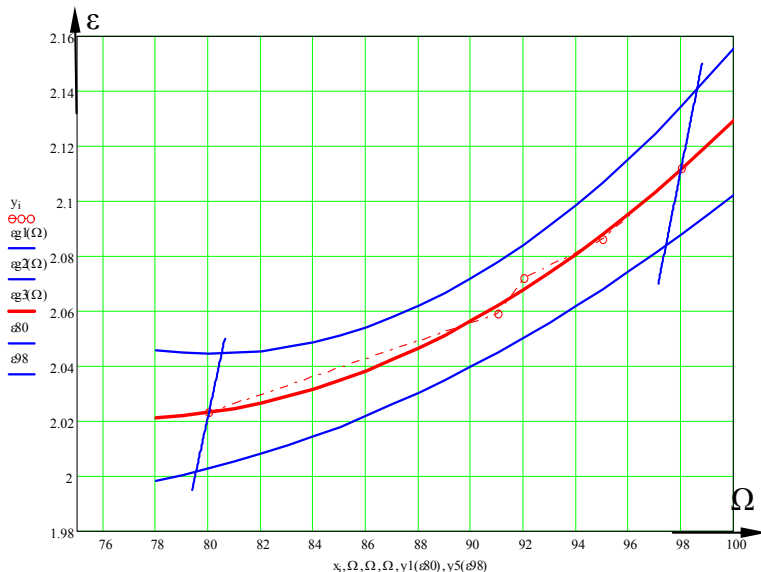


Рис. 4. Область возможных значений диэлектрических проницаемостей и октановых чисел стандартных бензинов

Следует отличать зависимость (11), полученную по данным компонентов бензинов в диапазоне октановых чисел  $\Omega=0 \div 120$  и зависимости (13), полученную для товарных бензинов в диапазоне  $\Omega =78 \div 100$ . Указанные зависимости подтверждают друг друга, так как совпадают в диапазоне  $\Omega =78 \div 100$  с погрешностью 10 %.

Анализ графика показывает, что максимальная чувствительность имеет место при измерении октановых чисел в диапазоне от 88 до 93. Начиная с октанового числа 95, чувствительность падает. Это связано с тем, что при получении высокооктановых бензинов применяется изооктан, бутаны и изопентан, которые при большом октановом числе имеют низкую диэлектрическую проницаемость.

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

$$\varepsilon = 3,196 - 0,06 \cdot Z + 1,389 \cdot 10^{-3} Z^2 - 1,097 \cdot 10^{-5} Z^3, \quad (14)$$

$$Z = -1,391 \cdot 10^6 + 1,797 \cdot 10^6 \varepsilon - 7,737 \cdot 10^5 \varepsilon^2 + 1,11 \cdot 10^5 \varepsilon^3. \quad (15)$$

Формулы (14), (15) 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 (рис.5).

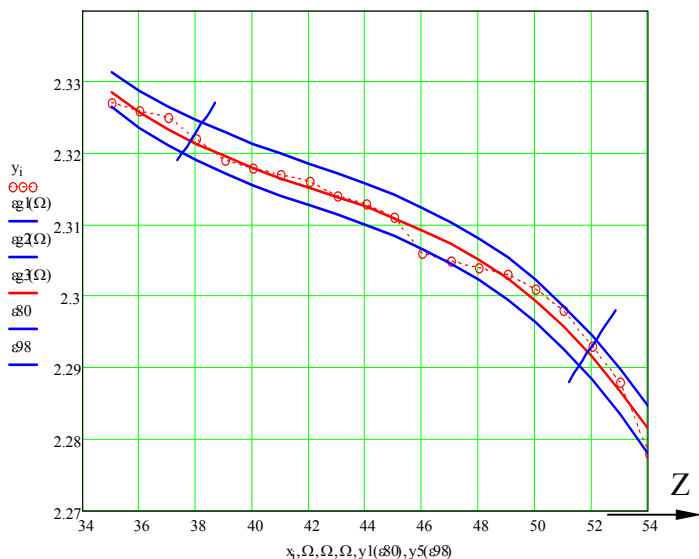


Рис. 5. Диапазон возможных значений цетановых чисел и диэлектрических проницаемостей стандартных дизельных топлив

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).

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

$$KDI = \frac{\varepsilon(1 - jtg\delta)}{\varepsilon_{ЭТ}(1 - jtg\delta_{ЭТ})} = \frac{\varepsilon[(1 + tg\delta_{ЭТ}tg\delta) + j(tg\delta_{ЭТ} - tg\delta)]}{\varepsilon_{ЭТ}(1 + tg^2\delta_{ЭТ})} = IDS + jINT, \quad (16)$$

$$\text{где} \quad IDS = \frac{\varepsilon(1 + tg\delta_{ЭТ}tg\delta)}{\varepsilon_{ЭТ}(1 + tg^2\delta_{ЭТ})} \approx \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ЭТ}} - \quad (17)$$

индекс детонационной стойкости (действительная часть КДИ),

$$INT = \frac{\varepsilon(tg\delta_{ЭТ} - tg\delta)}{\varepsilon_{ЭТ}(1 + tg^2\delta_{ЭТ})} - \quad (18)$$

индекс недостоверности топлива (мнимая часть КДИ),  $\varepsilon_{ЭТ}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta_{ЭТ}$ ,  $\delta$  - 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  $tg\delta_{ЭТ} = 122,8 \cdot 10^{-4}$ . Контролируемые стандартные бензины, имеющие октановое число меньше 108, будут иметь индекс детонационной стойкости меньше 1 и индекс недостоверности близкий к 0, если в них нет неорганических добавок.

В качестве эталонного компонента для дизельных топлив следует принять  $\alpha$ -метилнафталин, который при нулевом цетановом числе  $Z=0$ , имеет максимальную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{ЭТ} = 2,664$  и близкое к среднему для ароматических углеводородов значение тангенса угла потерь  $tg\delta_{ЭТ} = 165,8 \cdot 10^{-4}$ . Стандартные дизельные топлива, имеющие цетановое число больше нуля будут иметь индекс детонационной стойкости меньше единицы и индекс недостоверности 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.

Учитывая, что приборная микропроцессорная техника позволяет производить любые математические операции над сигналами можно пронормировать ИДС таким образом, чтобы октановому числу  $\Omega = 100$  соответствовал нормированный индекс детонационной стойкости (НИДС)  $NIDS = 1$ ; октановому числу  $\Omega = 98$  -  $NIDS = 0,98$ ; октановому числу  $\Omega = 80$  -  $NIDS = 0,8$  и в общем случае октановому числу  $\Omega$  -  $NIDS = 0, \Omega$ . Это позволило максимально сблизить формальное соответствие между октановым числом и индексом детонационной стойкости. При этом нормированный индекс детонационной стойкости (НИДС) определяется по формуле:

$$NIGS = F(IDS) = -224,758 + 711,629 \cdot IDS - 747,717 \cdot IDS^2 + 261,928 IDS^3. \quad (19)$$

Аналогично найдена нормировочная функция для дизельных топлив:

$$NIGS = F(IDS) = -2,7910^3 + 9,30810^3 \cdot IDS - 1,03210^4 \cdot IDS^2 + 3,80210^3 IDS^3. \quad (20)$$

На рис.6 показан график изменения индекса недостоверности топлива от значения тангенса угла потерь. Кривые, соответствующие бензинам, для которых за эталон принят толуол, и дизельным топливам, для которых за эталон принят  $\alpha$  – метилнафталин, практически совпадают и отличаются в третьем знаке только при малых углах потерь  $\text{tg}\delta < 10^{-3}$ . График показывает, что индекс недостоверности 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 FDS и FNT 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:  $Q = F(q)$ , (21)

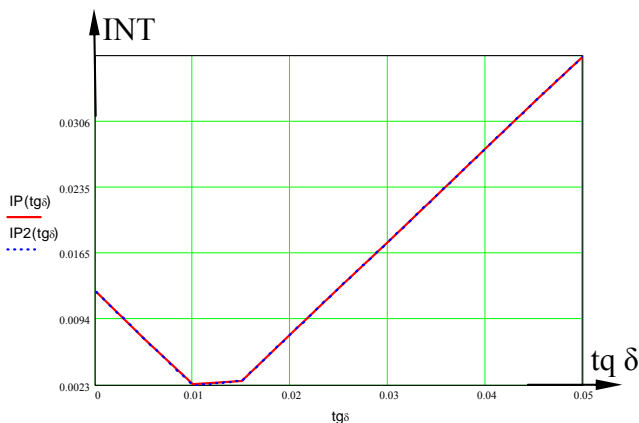


Рис. 6. График зависимости индекса недостоверности от тангенса угла потерь

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:

$$Q = F(q), \quad (21)$$

где  $q = \varepsilon(1 - j\text{tg}\delta)$  и функция  $F(q)$  в общем случае неизвестна.

Если пренебречь потерями, что можно сделать для стандартных топлив, то показатели детонационной стойкости определяются по выражениям (13), (15). При этом целесообразно откалибровать прибор на топливе с известной детонационной стойкостью. Функцию (21) можно получить экспериментально путем калибровки по нескольким точкам:

$$Q_X = b_0 + b_1 q_X + b_2 q_X^2 \dots + b_k q_X^k + \dots + b_n q_X^n = \sum_{k=0}^n b_k q_X^k, \quad (22)$$

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

$Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$  - показатели детонационной стойкости и соответствующие им диэлектрические проницаемости эталонных топлив. Выражение (22) моделирует нелинейную функцию преобразования, созданную по эталонным топливам и связывающую исследуемый показатель детонационной стойкости  $Q$  с комплексной диэлектрической проницаемостью  $q$ . Чем больше калибровочных образцов топлива, тем точнее математическая модель. Разработан алгоритм и способ измерений, который запатентован [11].

**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. Даны примеры СВЧ методов – стоячей волны и объемного резонатора, в которых об искомом параметре судят по длине волны электромагнитного излучения в контролируемой среде. Приведены обобщенные структурные схемы портативных приборов. Дан краткий обзор электронной элементной базы, необходимой для создания прибора оперативного контроля ДСТ. Ядром схемы является однокристалльная микроЭВМ, построенная на основе микроконтроллеров AT90S8515, AT89C51, PIC17C756.

Подробно проанализировано датчиковое обеспечение прибора. Кроме точности и надежности, важнейшим требованием к датчикам, применяемым в нефтехимии, является взрыво и пожаробезопасность. Это требует применения таких конструкций, которые при высокой чувствительности имеют низкие напряжения питания (до 5 В) и герметичные электрические соединения. В соответствии с частотным диапазоном емкостные датчики, используемые при конструировании рассматриваемых устройств контроля ДСТ делятся на следующие группы: низкочастотные ( $100 \div 1 \cdot 10^6$  Гц), высокочастотные ( $10^6 \div 10^8$  Гц), СВЧ – датчики ( $10^9 \div 10^{10}$  Гц), микроволновые ( $10^{11} \div 10^{13}$  Гц). Даны краткие сведения о наиболее характерных и перспективных конструкциях емкостных датчиков, которые по принципу работы удобны для исследования свойств нефтепродуктов. 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 рис.7. 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. Если топливо полностью соответствует эталонному, задаваемому параметрами  $C_{ЭГ} R_{ЭГ}$  выходной

сигнал моста равен нулю. При отсутствии равновесия в диагонали моста возникает напряжение, амплитуда которого зависит от показателя детонационной стойкости  $Q$ , а фаза от тангенса угла потерь  $tg\delta$ .

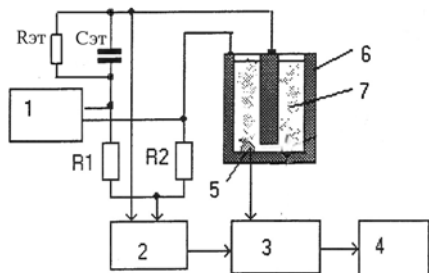


Рис.7. Мостовой прибор измерения детонационной стойкости топлив: 1 – генератор, 2- усилитель, 3 – аналого-цифровой преобразователь, 4 – микроЭВМ, 5 – датчик температуры, 6 – емкостной датчик, 7 - топливо

В частотной схеме, показанной на рис. 8, показатель детонационной стойкости топлива, зависящий от диэлектрической проницаемости, изменяет частоту таймера 2 -  $\omega(\epsilon)$ , а индекс подлинности топлива, зависящий от его проводимости - частоту таймера 3-  $\omega(\delta)$ .

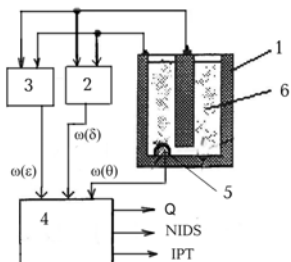


Рис. 8. Структурная схема прибора измерения детонационной стойкости и подлинности топлив с частотным преобразованием сигналов: 1 – датчик; 2, 3 – таймеры, 4 – контроллер, 5 – датчик температуры, 6 - топливо

Частотные сигналы подаются в контроллер, который вычисляет показатель детонационной стойкости  $Q$ , нормированный индекс детонационной стойкости  $NIDS$  и индекс подлинности топлива  $IPT$ . Показания корректируются в зависимости от сигнала датчика температуры. Прибор легко калибруется, для чего в датчик наливается толуол – для режима измерения детонационных характеристик бензинов или  $\alpha$  – 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 устройств контроля ДСТ. Определены основные и дополнительные погрешности. К основным отнесены погрешности калибровочной модели, датчиков, квантования, вычислений, а также шумы. При использовании метода, основанного на калибровке, значительную составляющую имеет *методическая* погрешность, определяемая 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  $\delta b_k$  и  $\delta q_X$  соответственно, для результирующей абсолютной погрешности измерений можно записать:

$$\delta Q_X = Q_X^P - Q_X = \sum_{k=1}^n k(b_k + \delta b_k)(q_X + \delta q_X)^k - \sum_{k=0}^n b_k q_X^k \quad (23)$$

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 (22).

Общая абсолютная погрешность определения параметра ДСТ  $\delta Q_X$  складывается из погрешности измерения электрофизического параметра  $\delta q_X$  (погрешность датчиков) и погрешности определения калибровочных коэффициентов  $\delta b_k$  (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  $\varepsilon$  и диэлектрические потери  $\varepsilon'$  жидких нефтепродуктов уменьшаются. Относительные температурные изменения диэлектрической проницаемости товарных бензинов показаны на рис.9. Отмечено, что для товарных бензинов в диапазоне 20÷30 °С имеет место максимальная скорость изменения диэлектрической проницаемости от температуры. В диапазоне температур (-20 ÷ +50) изменение  $\varepsilon$  от температуры описывается аналитической зависимостью:

$$\varepsilon = \varepsilon_{20}(1.5243 \cdot 10^{-8} \theta^4 - 6.5944 \cdot 10^{-7} \theta^3 - 1.9141 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 1.7365 \cdot 10^{-4} \theta + 1.0207), \quad (24)$$

Следует отметить, что графики изменений диэлектрической проницаемости при охлаждении и нагревании отличаются друг от друга на 10÷15 %, однако общий характер сохраняется. Экспериментальные исследования топлив показали, что удельная температурная погрешность измерения октанового числа бензинов составляет в среднем  $\delta \Omega_{\theta} = 0.024 \frac{\text{оч}}{\text{градС}}$ , цетанового числа дизельных топлив-

$\delta Z_{\theta} = 0.014 \frac{\text{чч}}{\text{градС}}$ , что в ожидаемых условиях эксплуатации требует обязательной

корректировки.



Рассмотрены методы повышения точности и стабильности емкостных устройств контроля ДСТ, которые делятся на три группы: конструктивные, программные и комбинированные. Способы достижения требуемых метрологических характеристик имеет свои особенности для различных методов измерений.

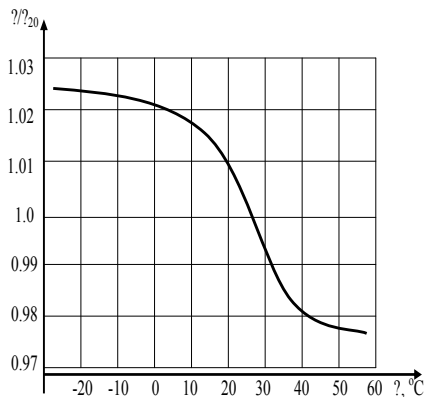


Рис. 10. График зависимости отношения относительных диэлектрических проницаемостей нефтепродуктов от температуры:  $\epsilon_{20}$  – относительная диэлектрическая проницаемость при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$

В работе рассмотрены схемы термокомпенсации. Эксперименты показали, что при использовании указанных методов компенсации температурная погрешность уменьшается до  $0.005\text{ \%}/\text{град } C$ . 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; внутрисприборное 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. Набор статистики и создание на ее основе калибровочных таблиц.

**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 о.ч
- Относительная погрешность ..... 0,5 %
- Время измерения ..... 10 сек
- Объем пробы ..... 50 мл

- Индикация.....цифровая (ЖКИ)
- Питание .....6 В (батарейки)
- Диапазон рабочих температур .....10 - +35 град С
- Масса ..... 0,6 кг
- Оперативная калибровка может проводиться на эталонных компонентах (толуол,  $\alpha$ -метилнафталин) и на товарных топливах.
- Автоматическая самодиагностика, индикация исправности.
- Вывод данных в ЭВМ и на принтер (по дополнительному заказу)

Прибор экспонировался на IV международном салоне инноваций и инвестиций в г. Москве в 2004 г. и на Третьей ярмарке бизнес-ангелов и инноваторов Приволжского федерального округа «Российским инновациям – российский капитал» в г. Самаре в 2005 г. где отмечен дипломом и получил положительные отзывы специалистов. Рассмотрены вопросы применения созданного прибора в технологическом процессе компаундирования (смешения) топлив. Разработана функциональная схема управления смешением бензинов на основе стабилизации потоков компонентов по заданной рецептуре с корректировкой расхода высокооктановой присадки по реальному показателю ДСТ.

## **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  $\omega_0 = 10^7 \div 10^9 \text{ Гц}$ ), 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. Исследование взаимосвязей электрических параметров и показателей детонационной стойкости, проведенные на основе разработанного алгоритма

статистического анализа компонентного состава стандартных топлив, выявил диапазоны 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  $\alpha$ -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  $40$  пФ, 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  $\delta Z_{\theta} = 0.024 \frac{\theta^{\circ}C}{градC}$ ,

цетанового числа дизельных топлив  $\delta Z_{\theta} = 0.014 \frac{\theta^{\circ}C}{градC}$ , что в ожидаемых условиях

эксплуатации требует корректировки. Повышение точности связано с конструктивными и программными методами, использование которых уменьшает погрешность до  $0.005$  %/град C.

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.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Васильев И.Р., Сковрцов Б.В., Забойников Е.А. Определение электродинамических параметров материалов в широком диапазоне частот.// “Измерительная техника” № 9. 1997 г.
2. Сковрцов Б.В., Забойников Е.А., Васильев И.Р. Анализ состояния проблемы контроля качества нефтепродуктов в динамических средах.// Сборник научных трудов НИИ “Приборостроения”, Самара, СГАУ, 1996.
3. Сковрцов Б.В., Забойников Е.А., Васильев И.Р. Определение электродинамических параметров материалов в широком диапазоне частот. //Тезисы доклада всероссийской научной конференции “Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов и систем”, Пенза, 1996.
4. Сковрцов Б.В., Забойников Е.А., Васильев И.Р., Куляс М.О. Универсальный анализатор нефтепродуктов. // Сборник докладов международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем”. Пенза, 1997 г.
5. Сковрцов Б.В., Астапов В.Н. , Конюхов Н.Е., Васильев И.Р., Пендюхов Е.П. Способ определения октанового числа бензинов и устройство для его осуществления.// Патент RU № 2091758, б.и. № 27, 1997.
6. Сковрцов Б.В., Астапов В.Н., Конюхов Н.Е., Васильев И.Р., Пендюхов Е.П. Устройство для измерения октанового числа бензинов.// Свидетельство на полезную модель № 10463, б.и. №7, 1999 г.
7. Сковрцов Б.В., Васильев И.Р., Пендюхов М.Е. Комплексование устройств контроля качества углеводородных топлив.// Сборник докладов V Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права», Сочи, 2002.
8. Васильев И.Р. Определение функции преобразования анализаторов качества нефтепродуктов по одному электрофизическому параметру.// Сб. докладов XIV научно- технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения и управления» (Датчик-2002), Судак, 2002.
9. Сковрцов Б.В., Васильев И.Р., Пендюхов М.Е. Методы и алгоритмы измерения плотности нефтепродуктов. Сборник докладов XV научно- технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-2003), Судак, 2003.
10. Сковрцов Б.В., Васильев И.Р., Пендюхов М.Е. Методы и алгоритмы измерения содержания серы в нефтепродуктах. // Сборник докладов XVI научно- технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик – 2004), Судак, 2004.
11. Сковрцов Б.В., Васильев И.Р., Жиганов И.Ю. Способ измерения показателей качества нефтепродуктов// Патент на изобретение №2227320, бюлл№11 от 20. 04. 2004 г.

Подписано в печать 20.04.2007. Тираж 100 экз.

Отпеч. с готовых оригинал-макетов

Типография СГАУ, г. Самара, Московское шоссе 34