

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

На правах рукописи

Поляков Сергей Александрович

СРЕДСТВО ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ БЕНЗИНА

Специальность 05.11.13 — "Приборы и методы контроля, природной среды, веществ, материалов и изделий".

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Волков М.А.

Орел – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 – АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ТРЕБОВАНИЙ, К БЕНЗИНУ И МЕТОДАМ ЕГО КОНТРОЛЯ.....	8
1.1 Бензин, его свойства, характеристики и классификация, области применения и показатели качества	8
1.2 Свойства автомобильных бензинов	9
1.3 Классификация и характеристики автомобильных бензинов	10
1.4 Анализ методов измерения основных характеристик бензина.....	12
1.5 Анализ примесей к топливу и их влияния на основные эксплуатационные характеристики бензина	16
1.6 Анализ способов повышения точности высокочастотных диэлькометрических октанометров	17
1.7 Анализ существующих математических моделей контроля.....	18
1.8 Анализ задачи определения октанового числа и содержания воды в бензине.	22
1.9 Постановка задачи на построение математической модели экспрессного контроля бензина	23
Выводы по первой главе	25
ГЛАВА 2 – РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ БЕНЗИНА	26
2.1 Математическая модель процесса экспрессного контроля бензина.....	26
2.2 Оценка допустимой погрешности измерения параметров топлива с использованием модели экспрессного контроля бензина, определение граничных значений емкости в измерении	42
2.3 Анализ способов уменьшения погрешности измерения параметров бензина	47
2.4 Анализ способов уменьшения влияния проводимости контура на точность контроля параметров бензина.....	55
Выводы по второй главе.....	63

ГЛАВА 3 – РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ БЕНЗИНА	64
3.1 Разработка функциональной схемы прибора экспрессного контроля	64
3.2 Определение корректирующих температурных коэффициентов при измерении диэлектрической проницаемости бензина	67
3.3 Определение диэлектрической проницаемости бензина с коррекцией от удельной проводимости топлива.....	71
3.4. Алгоритм экспрессного контроля бензина.....	75
Выводы по третьей главе	78
ГЛАВА 4 – РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНА	79
4.1 Выбор оптимального типа электростатического преобразователя	79
4.2 Разработка узлов прибора для контроля октанового числа бензина.....	84
4.3 Оценка корректности, устойчивости и сложности алгоритма экспресс контроля бензина	90
4.4 Особенности калибровки прибора контроля бензина.....	91
4.5 Вычисление суммарной погрешности прибора и оценка эффективности полученного результата.....	93
Выводы по четвертой главе	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	102
Приложение А	112
Приложение Б.....	116
Приложение В.....	121
Приложение Г	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена необходимостью контроля качества бензина при наличии в нем воды. Появление воды в бензине возникает в процессе жизненного цикла нефтепродуктов, в ходе которого происходит естественное накопление воды за счет гигроскопичности бензина и конденсации паров влаги. Такая же необходимость возникает из-за попыток фальсификации бензина. По данным Всероссийского общества прав потребителей, до 40 % продаваемого в стране топлива в настоящее время фальсифицировано. Статистика показывает, что из всех примесей в бензине практически около 70 % приходится на воду, поэтому остро встает вопрос об оперативном контроле бензина на наличие воды.

Удаление воды из топливной аппаратуры автомобиля в настоящее время возможно только путем физического вмешательства. При этом контролировать заправляемое топливо можно лишь по его косвенным признакам, причем на АЗС из всех контролируемых параметров топлива доступно только его октановое число.

Октановое число топлива определяют его тестированием исследовательским и моторным методами (ГОСТ 511-82, ГОСТ 8226-82). Выпускаемые в настоящее время октанометры (таблица 1) позволяют решать задачу оперативного контроля октанового числа топлива с низкой погрешностью измерения. Однако в данных приборах отсутствует возможность определения октанового числа топлива с примесью воды, наличие которой приводит к резкому повышению погрешности измерения октанового числа и недостоверным результатам контроля.

Принцип действия большинства современных приборов основан на диэлектрическом методе контроля, согласно которому октановое число определяется по диэлектрической проницаемости бензина, составляющей $\epsilon_{\text{бенз}} \approx 2...2,3$. При этом даже сравнительно небольшое количество воды, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{воды}} \approx 81$, может привести к ошибочным результатам при определении октанового числа. Экспериментально установлено, что добавление в бензин 1 % воды приводит к повышению его диэлектрической про-

нищаемости до уровня $\epsilon_{\text{изм}} \approx 2,9$ и, соответственно, к значительной погрешности измерения октанового числа бензина диэлькометрическим методом.

Вопросам контроля параметров бензина посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых, которые внесли существенный вклад в совершенствование методов и средств определения октанового числа: Г.Ф. Большаков, Т.Н. Митусов, Н.Е. Конюхов, В.Н. Астапов, Dobson M.C., Hallikainen F.T., Hilhorst M.A., Remke L. и др.

Однако, несмотря на наличие работ в данном направлении, более широкое применение приборов оперативного диэлькометрического контроля октанового числа практически ограничивается реальными свойствами бензиновой смеси, потенциальное наличие которой может приводить к недостоверным результатам контроля.

Целью диссертации является повышение точности средств диэлькометрического контроля октанового числа бензина, в том числе с содержанием воды.

Объектом исследования являются диэлькометрические методы измерения параметров бензина.

Предмет исследования – способы, средства и многопараметрические модели диэлькометрического измерения параметров бензина.

К основным задачам исследования относятся:

– сравнительный анализ калибровочных характеристик приборов диэлькометрического контроля октанового числа бензина при наличии мешающих воздействий;

– исследование зависимости влияния удельной проводимости на изменение резонансной частоты колебаний, оценка которых производится по нормированной амплитудно-частотной характеристике колебательной системы;

– разработка способов и алгоритмов измерения резонансной частоты при диэлькометрическом контроле бензина, обеспечивающих снижение инструментальной погрешности контроля октанового числа при его повышенной электропроводности и наличии воды;

– разработка структуры средства диэлькометрического контроля бензина с повышенной точностью и расширенным диапазоном измерения;

– экспериментальная проверка эффективности разработанного способа и прибора диэлектрического контроля октанового числа бензина.

Методы и средства исследований При решении научной задачи по контролю бензина с содержанием воды использовались методы математического и схемотехнического моделирования, методы аппроксимации характеристик нелинейных элементов, методы определения погрешностей измерений, функций комплексного переменного.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности:

п. 3. Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель процесса измерения диэлектрической проницаемости бензина методом частотного резонанса, отличающаяся компенсацией влияния электрической проводимости среды и учетом ее температуры при контроле октанового числа;

– разработан алгоритм определения резонансной частоты для диэлькометрического контроля качества бензина с коррекцией результатов измерений по удельной электрической проводимости и температуре, обеспечивающий повышение точности определения его октанового числа;

– разработана новая структура цифрового прибора для оперативного контроля качества бензина, основанная на предложенной математической модели и алгоритме преобразования, защищенная патентами на изобретение и полезную модель.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработаны цифровой прибор для контроля октанового числа бензина и высокостабильные емкостные преобразователи для допускового контроля углеводородного топлива.

Реализация и внедрение результатов исследований.

Результаты проведенных исследований внедрены на ЗАО «Научприбор» (г. Орел) и используются при проведении ОКР по модернизации аппаратуры, предназначенной для контроля состава жидких сред.

Апробация результатов работы.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований апробированы и обсуждены на 9 ой международной научно-практической конференции «Энерго и ресурсосбережение-2013» Всероссийских научно-технических конференциях «Научная сессия ТУСУР-2012», «Научная сессия ТУСУР-2013».

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 работ, включая 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 4 материалов и тезисов докладов, патент на изобретение и патент на полезную модель.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Модель процесса измерения дизелькометрической проницаемости бензина методом частотного резонанса, обеспечивающая повышение точности контроля его параметров за счет автоматической компенсации влияния внешних факторов.
2. Алгоритм определения резонансной частоты при контроле октанового числа бензина, обеспечивающий снижение погрешности резонансного измерения его дизелькометрической проницаемости за счет компенсации влияния электрической проводимости и температуры контролируемого топлива.
3. Структурная схема прибора для дизелькометрического контроля качества топлива, позволяющая уменьшить инструментальную погрешность при измерении параметров контролируемого бензина разных марок.

ГЛАВА 1 – АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ТРЕБОВАНИЙ, К БЕНЗИНУ И МЕТОДАМ ЕГО КОНТРОЛЯ

1.1 Бензин, его свойства, характеристики и классификация, области применения и показатели качества

Автомобильные бензины являются самым массовым продуктом нефтехимической промышленности. Около 25 % процентов нефти, добываемой в мире, превращается в бензин, являющийся основным видом топлива для автомобильного транспорта. В общем случае к бензину применяются четыре группы требований: требования связанные с работой двигателя, требования эксплуатации, требования, обусловленные возможностью и необходимостью массового производства, и экологические требования. Требования к бензину и его свойства наиболее подробно описаны в [1].

В соответствии с требованиями ГОСТ [2, 3] автомобильные бензины должны обладать следующими характеристиками и свойствами.

Высокие энергетические и термодинамические характеристики продуктов сгорания. При горении бензина должно выделяться максимальное количество тепла, продукты сгорания должны иметь малую молекулярную массу, небольшие теплоёмкость и теплопроводность, высокое значение произведения удельной газовой постоянной на температуру горения (которая характеризуется октановым числом).

Хорошая прокачиваемость. Бензины должны надёжно прокачиваться по топливной системе машин, трубопроводам, насосам, системам регулирования и другим агрегатам и коммуникациям при любых условиях окружающей среды – низкой и высокой температурах, различных давлениях, запылённости и влажности.

Оптимальная испаряемость характеризуется индексом испаряемости. В условиях хранения и транспортирования испарение должно быть минимальным. При применении в двигателе бензина должны иметь такую испаряемость, чтобы обеспечивать надёжное воспламенение и горение топлива с оптимальной скоростью в камерах сгорания двигателей.

Минимальная коррозионная активность. Топлива не должны содержать компоненты, которые разрушают конструкционные материалы двигателя, средства хранения и транспортирования.

Высокая стабильность в условиях хранения и применения. Топлива в течение длительного времени не должны изменять физико-химические и эксплуатационные свойства.

Нетоксичность. Продукты сгорания должны быть нетоксичными.

1.2 Свойства автомобильных бензинов

Бензины – топлива, выкипающие в интервале температур 28–215 °С и предназначенные для применения в двигателях внутреннего сгорания с принудительным воспламенением. В зависимости от назначения бензины разделяются на автомобильные и авиационные. Основными показателями бензина являются детонационная стойкость, давление насыщенных паров, фракционный состав, химическая стабильность и др. [1,7]. Ужесточение в последние годы экологических требований к качеству нефтяных топлив ограничило содержание в бензинах ароматических углеводородов и сернистых соединений. К свойствам бензинов относятся: детонационная стойкость, октановое число, фракционный состав, давление насыщенных паров, химическая стабильность, содержание сернистых и ароматических соединений.

Детонация возникает в том случае, если скорость распространения пламени в двигателе достигает 1500–2500 м/с, вместо обычной 20–30 м/с. В результате резкого перепада давления возникает детонационная волна, которая нарушает режим работы двигателя.

Октановое число – условный показатель, характеризующий стойкость бензинов к детонации и численно соответствующий детонационной стойкости модельной смеси изооктана и *n*-гептана. Октановое число изооктана принято за 100 пунктов, а *n*-гептана – за ноль. Для автомобильных бензинов октановое число измеряется двумя методами: моторным и исследовательским [4,5].

Фракционный состав бензинов характеризует испаряемость топлива. Испаряемость определяется температурой перегонки 10, 50 и 90 % выкипания фракций бензина. В соответствии с [6] фракционный состав бензина определяется при температуре выкипания 70, 100 и 180 °С.

Давление насыщенных паров даёт дополнительное представление об испаряемости бензина, а также о возможности образования газовых пробок в системе питания двигателя. Чем выше давление насыщенных паров бензина, тем выше его испаряемость. Бензины, применяемые в летнее время, имеют более низкое значение давления насыщенных паров.

В процессе хранения, транспортирования и применения бензинов возможны изменения в их химическом составе, обусловленные реакциями окисления и полимеризации. Окисление приводит к понижению октанового числа бензинов и повышению его склонности к нагарообразованию. Для оценки качества используют показатели содержания фактических смол, индукционного периода окисления.

Активные сернистые соединения, содержащиеся в бензинах, вызывают сильную коррозию топливной системы и транспортных емкостей. Неактивные сернистые соединения коррозию не вызывают, но образующиеся при их сгорании газы вызывают быстрый абразивный износ деталей двигателя.

1.3 Классификация и характеристики автомобильных бензинов

Существует несколько видов классификации автомобильных бензинов. Основные из них [1,4,5]: по испаряемости, по фракционному составу и по значению октанового числа.

Классификация по испаряемости. В зависимости от климатического района применения автомобильные бензины подразделяют на пять классов (таблица 1). Наряду с определением температуры перегонки при заданном объёме предусмотрено и определение объёма испарившегося бензина при заданной температуре.

Таблица 1. Основные характеристики бензина

Марка	А-92	АИ-95	АИ-98
ОЧ (моторный метод), не менее	82,5	85	88
ОЧ (исследовательский метод), не менее	91	95	98
Содержание свинца, г/дм ³ , не более	0,01		
Содержание марганца, мг/дм ³ , не более	18	-	-
Кислотность, мг/100 см ³	0,8	2	3
Содержание фактических смол, мг /100 см ³ , не более	5		
Массовая доля серы, %, не более	0,05		
Испытание на медной пластине	Выдерживает 1 класс		
Плотность при 15 °С, кг/м ³	725-780	725-780	725-780

Классификация по фракционному составу. В зависимости от фракционного состава автомобильные бензины разделяют на зимние и на летние. Зимние бензины предназначены для применения в северных и северо-восточных районах в течение всех сезонов и в остальных районах с 1 октября до 1 апреля. Летние бензины – для применения во всех районах, кроме северных и северо-восточных в период с 1 апреля по 1 октября; в южных районах допускается применять летний бензин в течение всех сезонов.

Классификация по октановому числу. В зависимости от октанового числа по исследовательскому методу устанавливают три марки бензинов: «Регуляр-92», «Премиум-95» и «Супер-98». Автомобильные бензины «Премиум-95» и «Супер-98» полностью отвечают европейским требованиям и предназначены в основном для зарубежных автомобилей, эксплуатируемых в России.

Компонентный состав бензина зависит, в основном, от его марки, и определяется набором технологических установок на нефтеперерабатывающем заводе. Базовым компонентом для выработки автомобильных бензинов являются обычно бензины каталитического риформинга или каталитического крекинга[74].

Бензины АИ-95 и АИ-98 обычно получают с добавлением кислородсодержащих компонентов: метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) или его смеси с трет-бутанолом, получившей название фэтерол. Введение МТБЭ в бензин позволяет повысить полноту его сгорания и равномерность распределения детонационной

стойкости по фракциям. Максимально допустимая концентрация МТБЭ в бензинах составляет 15 % из-за его относительно низкой теплоты сгорания и высокой агрессивности по отношению к резинам. Для достижения требуемого уровня детонационных свойств этилированных бензинов к ним добавляют этиловую жидкость (до 0,15 г свинца/дм³ бензина).

1.4 Анализ методов измерения основных характеристик бензина

В настоящее время существует большое количество способов анализа качества и измерения основных характеристик бензина. Их можно классифицировать по оперативности контроля и по методу измерения [8].

По оперативности контроля разделяют быстрые способы контроля [9] (экспрессные), предполагающие получение результата измерения не более единиц минут, и медленные [10,11,12], предполагающие обработку не менее чем в течение нескольких часов.

Наибольшее распространение получили методы экспрессного контроля характеристик бензина. Это обстоятельство связано с тем, что в настоящее время основной поток бензина получают не путем прямой перегонки, а путем смешивания (компаундирования) большого числа компонентов [16]. При этом во время компаундирования нужно контролировать соотношение компонентов смешения (концентрации), их качественные характеристики, а также получаемый в результате смешения товарный бензин, с целью внесения оперативных корректировок в приготовление бензина. Кроме того, экспрессный контроль особенно актуален в конце жизненного цикла нефтепродуктов при продаже его на АЗС конечному пользователю.

По способу измерения методы контроля можно разделить на механические, химические и физические методы [15].

С точки зрения оперативности контроля наиболее приемлемыми методами являются физические и механические методы.

Наибольший интерес с точки зрения экспрессного контроля представляют физические методы, которые основаны на преобразовании измеряемого параметра в другую физическую или физико-химическую величину, более удобную для измерения и дальнейшего преобразования. Часто выделяются в отдельные группы электрические и неэлектрические методы. В основу первых положено прямое измерение электрических параметров материалов, а у вторых измеряемая физическая величина не является электрической. Комбинирование методов обеих групп осуществляется в многопараметрических методах.

К важнейшим неэлектрическим методам контроля относятся методы, основанные на использовании следующих эффектов: теплофизических характеристик материалов; акустических свойств материалов; методов, основанных на использовании видимого света и инфракрасного излучения. Последнюю подгруппу иногда именуют «спектральными методами».

Из неэлектрических методов наибольшее распространение в практике измерений параметров топлива получили методы спектрального анализа, которые реализуются с большой материалоемкостью и стоимостью.

Большинству неэлектрических методов присущ целый ряд недостатков: для измерения нужно брать пробы, параметры определяются не во всем объеме контролируемого материала, а также высокая стоимость применяемого оборудования.

В значительной мере указанных недостатков лишены две другие разновидности: *кондуктометрические и диэлькометрические* методы [17]. Первые из них применяют путем измерения комплексного сопротивления материала на постоянном или переменном токе промышленной или звуковой частоты. В связи с тем, что автомобильные бензины и, в частности, их измеряемые параметры не очень линейны, применение кондуктометрического метода становится практически невозможным вследствие недостаточной чувствительности и больших погрешностей таких измерительных устройств.

Для *диэлькометрических* методов контроля характерно измерение свойств материалов (комплексной диэлектрической проницаемости и ее составляющих) в широком диапазоне частот – от $5 \cdot 10^3$ Гц до $5 \cdot 10^7$ Гц.

Такие приборы получили широкое распространение благодаря ряду достоинств, основными из которых являются:

1) возможность использования их для измерения параметров широкого класса материалов, получения погрешностей, удовлетворяющих требованиям к электрическим измерителям параметров автомобильных бензинов и осуществления такими приборами как дискретного, так и непрерывного, практически безынерционного или экспрессного контроля;

2) отсутствие необходимости применения каких-либо средств биологической защиты при эксплуатации приборов;

3) использование сравнительно несложной, недорогой, простой в эксплуатации и высоконадежной в работе электронной аппаратуры, а также простота получения унифицированных выходных сигналов, что повышает универсальность и расширяет области применения приборов контроля.

Диэлькометрические методы измерения основаны на взаимодействии электромагнитного поля и среды. При внесении вещества в электромагнитное поле искажается картина поля, а само вещество либо поляризуется, либо в нем наводятся вихревые токи. Вид поляризационных процессов, распределение вихревых токов и возмущенного поля зависят от геометрической формы и размеров, от содержания воды, температуры, минералогического и химического состава, а также структурных особенностей исследуемых образцов.

Поведение диэлектрика в электромагнитном поле характеризуется величинами относительными диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемости. У материалов, не содержащих ферромагнетиков, величина $\mu \approx 1$ (соответствует магнитной проницаемости вакуума) и их электрические свойства в электрических полях можно описать диэлектрической проницаемостью ϵ и удельной проводимостью σ .

Следует отметить, что автомобильный бензин обладает довольно низкой электрической проводимостью. Удельная электрическая проводимость рассматриваемых видов автомобильного топлива находится практически в пределах $10^{-17} \dots 10^{16}$ [1/Ом·м].

В целях предотвращения накопления статического электричества в бензобаках и других емкостях, в бензин добавляют специальные присадки, которые увеличивают диэлектрическую проводимость. Поэтому проводимость бензинов, измеренная на частотах 100–1000 Гц при температуре 20 °С составляет $(3 \div 10) \cdot 10^{-16}$ [1/Ом·м] [17,19]. Следует отметить, что выше названные параметры линейно и нелинейно могут зависеть от температуры измеряемой среды.

Физическая природа величин диэлектрической проницаемости ϵ и электрической проводимости σ измеряемых автомобильных бензинов различна [34,39]., и связь между этими параметрами зависит от многих факторов, к которым относятся: состав бензина, его температура на момент измерения, наличие примесей в топливе и т. д.

Изменение проводимости материалов в общем случае влияет на выходную электрическую величину электростатического или емкостного измерительного преобразователя. При этом не использовать значение величины удельной электрической проводимости нельзя, так как она является основным параметром, по которому практически можно оценить наличие электропроводящих примесей в бензине и их измерить. Отсюда следует, что при построении приборов для контроля качества топлива необходимо разделять тракты измерения диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости для уменьшения взаимного влияния этих параметров друг на друга и повышения точности измерения октанового числа.

1.5 Анализ примесей к топливу и их влияния на основные эксплуатационные характеристики бензина

Рассмотрим существующие присадки и примеси к автомобильному бензину [13, 14]. В настоящее время они подразделяются на присадки (полезные примеси, улучшающие потребительски показатели качества бензина) и примеси (вредные добавки, отрицательно влияющие на качество топлива). Анализ основных присадок, приведенный в приложении А, позволят сделать вывод, что основной набор вводимых в товарные бензины присадок в процессе изготовления регламентирован ГОСТ [2, 3, 4,5].

При этом в случае контроля параметров *диэлькометрическим* способом конечная величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости σ является производной множества данных параметров каждого компонента, входящего в состав бензина. Соответственно:

$$\epsilon_{\text{бензина}} = \epsilon_{\text{основы}} + \epsilon_{\text{присадок}} + \epsilon_{\text{примесей}} .$$

Аналогичное выражение можно записать для удельной электрической проводимости:

$$\sigma_{\text{бензина}} = \sigma_{\text{основы}} + \sigma_{\text{присадок}} + \sigma_{\text{примесей}} .$$

Так как диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость основы и примесей является строго нормированной величиной и соответственно от образца к образцу не изменяется, ее необходимо считать константой. Соответственно:

$$\epsilon_{\text{бензина}} = k_1 \epsilon_{\text{примесей}} , \quad \sigma_{\text{бензина}} = k_2 \sigma_{\text{примесей}} .$$

В связи с ограничениями, накладываемыми диэлькометрическим способом измерения, появляется возможность измерить примеси и присадки в топливе, величина диэлектрической проницаемости и удельной проводимости которых как минимум на порядок выше аналогичных параметров измеряемой среды.

1.6 Анализ способов повышения точности высокочастотных диэлькометрических октанометров

Для анализа качественных характеристик бензина применяют различные измерительные схемы, основанные на известных методах радиотехнических измерений резистивно-емкостных параметров диэлектриков [30,38].

Однако диэлектрические измерения товарных бензинов [18,31,32] имеют ряд специфических особенностей, к которым относятся следующие:

- максимальная емкость датчиков обычно ограничена десятками пикофарад и редко превышает 100 пФ;
- существует явная зависимость изменения емкости датчиков от температуры контролируемой среды;
- наличие активной проводимости измеряемой среды.
- современные приборы контроля качества топлива градуируют эмпирическим путем, и измерение производят путем сравнения результатов измерения с базовой моделью.

Анализ измерительных устройств, построенных на диэлькометрическом методе измерения, приведенный в приложении Б, позволят сделать предварительный вывод о том, что для контроля качества бензина наиболее целесообразным является использование резонансного метода измерения. В качестве косвенных измеряемых параметров топлива используют амплитуду или частоту резонансных колебаний колебательной системы, в состав которой включен емкостный преобразователь.

Устройства, построенные на автогенераторном методе и основанные на методе биений частоты, обладают погрешностью измерений, которая связана с зоной нечувствительности смесителей частоты, составляющей практически не менее 50–100 Гц, что позволяет получить погрешность высокочастотного измерительного тракта в пределах 1 – 2 %.

С учетом вышеизложенного, при разработке и практическом использовании автогенераторных схем необходимо учитывать ряд факторов:

1. При применении LC -генераторов с самовозбуждением колебаний в случае наличия активных потерь в емкостном преобразователе, входящем в колебательный контур, угловая частота собственных колебаний генератора ω отличается от резонансной частоты $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ идеального контура, содержащего только индуктивность L и емкость C . Влияние потерь на частоту описывается следующим соотношением [27,28]

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{1 + 1/Q^2}},$$

где Q – добротность контура на частоте резонанса.

2. Амплитудное условие самовозбуждения генератора выполняется при уменьшении резонансного сопротивления контура лишь до минимально допустимого активного сопротивления преобразователя. Если резонансное сопротивление ниже этого значения, то происходит срыв колебаний.

Автогенераторные измерительные приборы, основанные на принципе сравнения или биения частот, позволяют повысить точность измерения при небольших потерях в среде. Однако при близких значениях сравниваемых частот может возникнуть синхронизация колебаний генераторов из-за паразитной связи между ними, когда оба генератора начинают работать на одной частоте даже при разных резонансных частотах настройки их контуров.

1.7 Анализ существующих математических моделей контроля бензина диэлькометрическим способом

Для решения задачи повышения точности и оперативности контроля качества товарных бензинов существует возможность использования известных моделей диэлькометрических измерений [35,36]. Существующие модели можно классифицировать по количеству измеряемых параметров и по принципу измерения.

По количеству измеряемых параметров модели классифицируются на однопараметрические и многопараметрические [50,78]. В общем случае модель дизелькометрического измерения представлена на рисунке 1.1.

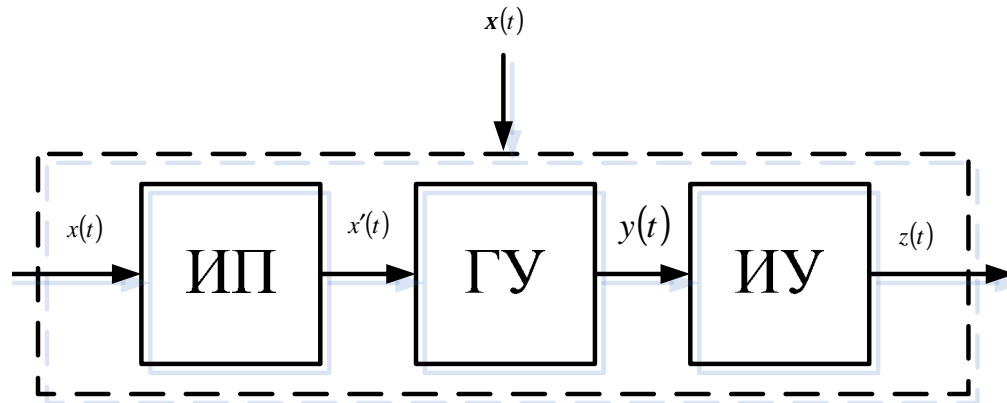


Рисунок 1.1. – Модель дизелькометрического измерения

Модель содержит измерительный преобразователь (ИП), генераторное устройство (ГУ), измерительное устройство (ИУ). $x(t)$ – измеряемый параметр, $x'(t)$ – изменение параметров измерительного преобразования, $y(t)$ – реакция генераторного устройства, $z(t)$ – результат измерения. В общем случае на модель воздействуют комплексные помехи и погрешности $\xi(t)$.

При подобной постановке задачи $z(t)$ является результатом нелинейного функционального преобразования $x(t)$. Соответственно в однопараметровых моделях один измеряемый параметр, а в многопараметровых моделях учитывают несколько таких параметров.

Частный случай контроля качества бензина дизелькометрическим способом на основе однопараметровой модели контроля описан в [64,65]. Согласно данной модели качество топлива контролируется только с точки зрения измерения октанового числа, причем в качестве $x(t)$ используется значение диэлектрической проницаемости ϵ , а результатом $z(t)$ является значение октанового числа бензина. На данную модель накладывается ряд ограничений:

- измерение производится при определенной температуре;

- состав бензина строго соответствует ГОСТ на предмет примесей;
- отсутствует влияние удельной проводимости среды на генераторное устройство.

Многопараметровые модели аналогичны однопараметровым за исключением того, что измеряемых параметров используется несколько. В частности, для контроля бензина следует использовать относительную диэлектрическую ϵ проницаемости и удельную проводимость σ и температуру среды t . Данная модель позволяет, используя множество параметров, уйти от ограничений проводить измерение на определенной частоте, а учитывая удельную проводимость σ говорить о наличии в измеряемой среде токопроводящих примесей.

По методу измерения модели разделяют на модели косвенного измерения и сравнительные модели [52].

Модели косвенного измерения основаны на том факте, что измерительное преобразование представляет собой выражение размера одной физической величины размером другой физической величины связанной с ней функционально, то есть измеряемый параметр косвенно является функцией входной величины измерительного преобразователя от выходной. Наиболее благоприятным с точки зрения измерения случаем является линейная зависимость преобразования, то есть прямую пропорциональность между изменением входной величины и соответствующим приращением выходной величины преобразователя. Так, для модели многопараметрического контроля качества бензина подобное выражение имеет вид:

$$z(\epsilon, \sigma, t) = z_0(\epsilon, \sigma, t) + S\Delta x.$$

Для описания подобной зависимости достаточно двух параметров $z_0(\epsilon, \sigma, t)$ – начальное значение выходной величины соответствующей начальному значению входной величины x , показателя относительного наклона характеристики

$$S = \frac{\Delta z}{\Delta x}.$$

В данной модели приняты следующие ограничения:

- удельная электрическая проводимость не оказывает влияния на измерительный преобразователь;

- систематические погрешности пренебрежительно малы.

К недостаткам данной модели можно отнести:

- невозможность идентификации незаявленного бензина;

- сложность оценки влияния внешних воздействий на результат измерения.

Сравнительные модели основаны на факте сравнения модели, полученной в результате измерения, с эталонной моделью, хранящейся в памяти измерительного прибора. При этом по определенному алгоритму делается вывод о соответствии полученной модели с эталонной.

При проведении работ по созданию калибровочных моделей для определения октановых чисел было выявлено, что успешно решать эту задачу можно только в случае, если калибровочное множество (набор параметров с известными значениями октанового числа) принадлежит некоторому определенному классу, характеризующемуся сходством по углеводородному составу [21,22]. Другими словами: невозможно создать универсальную модель определения октановых чисел для бензинов различных процессов (крекинг, риформинг и т. д.) или различных типов (например, для бензинов марок АИ-92 и АИ-95 приходится создавать разные модели).

Для сравнительной модели приняты следующие ограничения:

- измерительный прибор заранее откалиброван эталонными моделями;

- температура измеряемой среды соответствует заявленному диапазону измерения.

К недостаткам данной модели можно отнести:

- невозможность создания универсальной калибровочной модели;

- необходимость применения алгоритмов для определения класса калибровочной модели;

- для построения калибровочной модели необходим анализ большого объема исходных данных.

Следовательно, для повышения точности измерения наиболее оптимальным методом является сравнительная модель измерения, позволяющая количественно оценить, на сколько по сравнению с эталоном в измеряемый образец внесены изменения. Однако в условиях априорной неизвестности марки исследуемого топлива данная модель становится менее эффективной и позволяет оценивать полученный результат с большей погрешностью.

1.8 Анализ задачи определения октанового числа и содержания воды в бензине.

В настоящее время за рубежом, в США, Японии, Франции, Англии проблема контроля бензинов определенно существует, об этом свидетельствуют решения предлагаемые производителями вышеназванных стран по его контролю, описанные в [23,24,25,26]. Предлагаются различные подходы по экспрессному контролю бензина, в частности например фирма Petrotech предлагает автономную портативную систему измерения октанового числа построенную на основе кондуктометрического метода, Yorogawa Hokusin Electric corporation предлагает решать проблему оперативного контроля бензина путем анализа плотности соответствующего нефтепродукта. Следует отметить, что точность измерения иностранных приборов относительно невысокая, в частности анализатор Petrotech предназначен для допускового контроля октанового числа бензина в пределах заданной марки и говорит о факте соответствия или не соответствия тому или иному типу. Подобный подход к проблемам оперативного контроля октанового числа в конце жизненного цикла нефтепродуктов, конечным пользователем, определяется отсутствием необходимости. Связано это с тем что, процент фальсификата в указанных странах гораздо ниже, чем в странах постсоветского пространства, а также очень сильно развиты мобильные химические лаборатории и законодательные нормы гораздо жестче.

Таким образом, при анализе существующих приборов контроля бензина, наибольшее внимание необходимо уделять приборам стран участниц в процессе производства нефти, а также компаний в развивающихся странах.

1.9 Постановка задачи на построение математической модели экспрессного контроля бензина

Проведенный анализ показал, что с точки зрения экспрессного измерения бензин, как среда, характеризуется величиной диэлектрической (ϵ) и удельной электрической проводимостью (σ). Известно, что диэлектрическая проницаемость бензина зависит от частоты измерения, и с ее увеличением она сложным способом уменьшается из-за наличия в бензине электрически ассиметричных сравнительно больших инерционных ассоциаций, которые с повышением частоты поля они не успевают смешаться [33].

Физическая природа величин ϵ и σ измеряемых автомобильных бензинов различна, и связь между этими параметрами зависит от многих факторов: состава бензина, его температуры на момент измерения, наличия примесей и т. д. Изменение проводимости материалов влияет на выходную электрическую величину электростатического преобразователя. При этом не использовать значение величины удельной проводимости нельзя, так как это основной параметр, по которому возможно измерение наличия электропроводящих примесей в бензине. Отсюда следует, что необходимо разделение трактов измерения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости с уменьшением взаимного влияния этих параметров друг на друга.

Задачу определения октанового числа бензина можно сформулировать следующим образом: определить неизвестное значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\text{бенз}}$) и удельной проводимости $\sigma_{\text{бенз}}$ в рассматриваемой полосе частот (f_H, f_B) при условии обеспечения минимальных погрешности измерения $\delta_{\text{изм}} \rightarrow \min$ и времени измерения $t_{\text{изм}} \rightarrow \min$.

На входе модели экспрессного контроля качества бензина одновременно присутствуют две неизвестные величины: диэлектрическая проницаемость и температура топлива.

В соответствии с ГОСТ [35], общая погрешность метода измерения относительной диэлектрической проницаемости резонансным методом при доверительной вероятности 0,95 не должна быть более $\pm(14) \%$ – для относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне от 1 до 100 единиц. Общее время измерения метода диэлькометрического измерения находится в пределах от одной до трех секунд.

На основании проведенного анализа следует наложить определенные ограничения на разрабатываемую модель:

- температура измеряемой среды не ниже 0 °С;
- измеряемая среда не содержит пыли и прочих не проводящих электрический ток примесей;
- величина удельной проводимости примесей не менее чем на порядок больше величины удельной проводимости базовой основы.

Выводы по первой главе

1. В результате проведенного анализа свойств и характеристик бензина установлено, что наиболее значимым параметром для контроля бензина является его октановое число.

2. Установлено, что применение диэлькометрического метода измерения дает возможность установить в качестве косвенных параметров бензина для определения его октанового числа относительную диэлектрическую проницаемость ϵ , удельную проводимость σ и температуру T .

3. Анализ примесей к бензину и их влияния на его основные характеристики, позволил определить воду, как наиболее существенно влияющую его на эксплуатационные характеристики.

4. Проведено сравнение моделей процесса диэлькометрического контроля и установлено, что для описания процесса экспрессного контроля бензина целесообразно использовать многопараметрические модели контроля, сняв в них ограничение на параметр удельная проводимость.

5. Для исследования влияния выбранных косвенных параметров бензина на определение его октанового числа необходимо разработать математическую модель процесса экспрессного контроля бензина.

ГЛАВА 2 – РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ БЕНЗИНА

2.1 Математическая модель процесса экспрессного контроля бензина

В соответствии со сформулированной задачей исследования обобщённая модель экспресс-контроля качества бензина включает в себя два первичных измерительных преобразователя (ИП1 и ИП2), генераторное (ГУ) и измерительное (ИУ) устройства (рис. 2.1).

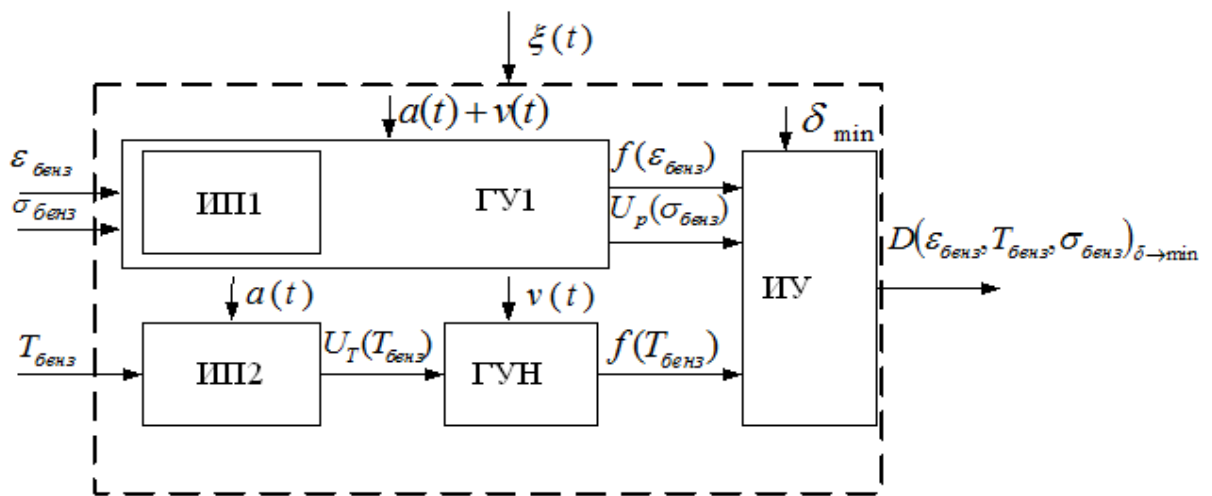


Рис. 2.1 – Обобщенная схема прибора контроля качества бензина

Контролируемые параметры $\varepsilon_{\text{бенз}}$, $\sigma_{\text{бенз}}$ и $T_{\text{бенз}}$ поступают на вход соответствующего первичного измерительного преобразователя, где преобразуются в частотно-зависимые величины $f(\varepsilon_{\text{бенз}})$ и $f(T_{\text{бенз}})$ путем изменения резистивно-емкостных параметров измерительного двухполюсника. Генераторное устройство ГУ1 реагирует на входные воздействия на его элементы, которые вызывают пропорциональные изменения частоты выходного напряжения. Эти значения в дальнейшем измеряются с помощью измерительного устройства ИУ (рис. 2.1).

При работе схемы изменение диэлектрической проницаемости топлива, являющейся функцией октанового числа, приводит к изменению емкости датчика, что изменяет резонансную частоту настройки контура, к которому подключен

датчик, таким же образом происходит измерение температуры топлива. Измерительный преобразователь ИП1 содержит колебательный контур с емкостным датчиком, поэтому изменение октанового числа и температуры вызывает пропорциональное изменение резонансной частоты соответствующего контура и, как следствие, изменение амплитуды, частоты и фазы выходного сигнала генератора ГУ1. На изменения этих параметров реагирует ИУ1 и вычисляет по заданному алгоритму значение октанового числа бензина.

Реальные измерения происходят в условиях воздействия на прибор различных помех и шумов $\xi(t)$, которые имеют в общем случае случайный характер и ухудшают точность и стабильность измерений [29]. Перечислить все паразитные воздействия достаточно трудно, можно назвать наиболее важные, которые условно разбиты на три группы (рис. 2.1).

Первая группа побочных влияний $\alpha(t)$ относится к первичному измерительному преобразователю. Это зависимость показаний ИП от множества сопутствующих неконтролируемых параметров, а также нелинейность характеристики преобразования значения октанового числа в выходной сигнал ИП1. Погрешности измерений, связанные с этими факторами, имеют достаточно сложный характер. Можно отметить, что они зависят от конструктивного исполнения измерительного преобразователя и наличия в нем паразитных элементов, от диапазона изменения и характера измеряемой величины, количества и степени влияния внешних факторов, чувствительности ИП1 к изменениям контролируемого параметра и к паразитным воздействиям.

Вторая группа влияющих факторов $\nu(t)$ относится к генераторному устройству. Это нестабильность работы, нелинейная зависимость выходного параметра ГУ (амплитуды, частоты или фазы) от параметров ИП1, различного рода шумы и помехи, дрейф нуля усилителей и пр. Величина погрешностей, связанных с работой генераторного устройства, зависит от вида резонансной системы, выбора схемы и типа активного нелинейного элемента, стабильности питающих напряжений и элементов схемы автогенератора.

Последнюю группу случайных воздействий составляют погрешности $\delta(t)$, неизбежно сопровождающие процесс измерения амплитуды, частоты или фазы с помощью измерительного устройства ИУ. Данные погрешности существенным образом зависят от выбора измеряемого параметра, а также методики проведения измерений и конкретной схемы прибора.

Работу диэлектрического измерителя, содержащего типовой транзисторный автогенератор (например, с индуктивной обратной связью), можно описать нелинейным стохастическим дифференциальным уравнением второго порядка следующего вида [29,40]:

$$d^2i/dt^2 + 2I di/dt + w_0^2 i = 0, \quad (2.1)$$

где $2\lambda = (R_{\Sigma}C)^{-1} - MS(y)/LC$; M – коэффициент взаимоиндукции в цепи обратной связи генератора; R_{Σ} – максимальное эквивалентное сопротивление контура на резонансной частоте $\omega = \omega_0$, причем $\omega_0^2 = 1/LC$.

Уравнение (2.1) является нелинейным из-за наличия нелинейного коэффициента $\lambda = \lambda(y)$ при первой производной, обусловленного нелинейностью крутизны $S = S(y)$ вольтамперной характеристики усилительного элемента (транзистора), применяемого в любой схеме генератора.

Рассмотрим наихудший случай, когда правая часть выражения (2.1) представляет собой белый гауссовский шум $\zeta(t)$ с нулевым математическим ожиданием и дельтаобразной корреляционной функцией следующего вида

$$M\{\zeta(t_1) \cdot \zeta(t_2)\} = N\delta(t_2 - t_1). \quad (2.2)$$

Это допущение вполне приемлемо при отсутствии полезного воздействия, если значение $e_x(t) = 0$, и в силу первой предельной теоремы [15, 16], так как сумма нескольких случайных величин с разными законами распределения стремится к нормальному закону.

В идеальном случае (при отсутствии паразитных влияний) решение уравнения (2.1) для стационарного режима работы генератора имеет вид [48]

$$i(t) = i \cos(\omega_0 t + j_0). \quad (2.3)$$

При этом флуктуации амплитуды $a(t)$ и фазы $\varphi(t)$, обусловленные случайным шумом $\zeta(t)$, могут быть представлены выражениями

$$a(t) = \omega_0 \int_{-\infty}^t \exp[-2\lambda(t-x)] \zeta(x) \sin(\omega_0 x + \varphi_0) dx; \quad (2.4)$$

$$j(t) = j_0 + \frac{W_0}{i} \int_0^t z(x) \cos(\omega_0 x + j_0) dx. \quad (2.5)$$

Из этих формул следует, что флуктуации амплитуды $a(t)$ представляют собой гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и с корреляционной функцией

$$R_a(\tau) = D_a \exp(-2\lambda|\tau|), \quad D_a = N\omega_0^2 / 16\lambda, \quad (2.6)$$

а закон изменения полной фазы $\varphi(t)$ – нестационарный гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией [37, 41]:

$$D_\varphi(t) = Dt, \quad D = N\omega_0^2 / 4A_0^2. \quad (2.7)$$

Флуктуации фазы вызывают случайный разброс частоты относительно ее номинального значения. Это может существенно увеличить погрешности резонансных методов измерений, если не принимать мер по уменьшению влияния паразитных воздействий и соответственному снижению спектральной плотности шума N в выражениях (2.6) и (2.7).

Меры по снижению паразитных влияний для различных элементов измерителя октанового числа (рис. 2.1) будут разными.

Для ИП1 можно записать:

$$e_x(f)' = f(e_x, e_{x_1}, e_{x_2}, \dots, e_{x_n}), \quad (2.8)$$

где e_x – контролируемая величина, а $\alpha(t) = \{\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \dots, \varepsilon_{x_n}\}$ – множество побочных влияющих величин.

Если взять полный дифференциал этой функции, перейти к конечным приращениям и выполнить несложные преобразования, то можно получить выражение для относительного изменения величины $\varepsilon_X(f)'$:

$$\Delta e_{\text{бенз}}(f)' / e_X(f)' = S_{e_{\text{бенз}}/e_X} \cdot \frac{\Delta e_{\text{бенз}}}{e_X} + \sum_{i=1}^n S_{e_{\text{бенз}}/e_{X_i}} \cdot \frac{\Delta e_{X_i}}{e_{X_i}}, \quad (2.9)$$

где $S_{e_{\text{бенз}}/e_X}$ и $S_{e_{\text{бенз}}/e_{X_i}}$ – относительные значения чувствительности ИП к изменению измеряемого параметра и влияющих величин соответственно:

$$S_{e_{\text{бенз}}/e_X} = \frac{\partial e_X' / e_X'}{\partial e_X / e_X} = \frac{\partial e_X'}{\partial e_X} \cdot \frac{e_X}{e_X'};$$

$$S_{e_{\text{бенз}}/e_{X_i}} = \frac{\partial e_X' / e_X'}{\partial e_{X_i} / e_{X_i}} = \frac{\partial e_X'}{\partial e_{X_i}} \cdot \frac{e_{X_i}}{e_X'}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.10)$$

Первое слагаемое в выражении (2.9) показывает полезное изменение выходного параметра $\varepsilon_X(f)'$ при изменении контролируемой величины ε_X , причем это изменение пропорционально чувствительности измерительного преобразователя к ее изменению Δe_X . Второе слагаемое позволяет оценить влияние паразитных воздействий в формировании выходной величины, приводящего к увеличению погрешностей результатов измерений. В общем случае точность ИП можно характеризовать относительной погрешностью Γ :

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_{y/e_{X_i}} \cdot (\Delta e_{X_i} / e_{X_i})}{S_{y/e_X} \cdot (\Delta e_X / e_X)}. \quad (2.11)$$

Анализ выражения (2.11) позволяет сделать предварительные выводы о путях уменьшения погрешности, вносимой первичным измерительным преобразователем. Прежде всего, необходимо минимизировать числитель выражения (2.11), поэтому надо стремиться снижать чувствительность ИП к побочным влияющим факторам, а также принимать меры по уменьшению диапазона изменения влияющих величин. Однако полностью исключить действие влияющих величин, как правило, не удастся, либо это может быть связано с неприемлемым усложнением ИП [43]. Максимизация знаменателя также приводит к уменьшению погрешно-

сти измерений, но для этого нужно увеличить чувствительность ИП1 к изменениям контролируемой величины e_x по сравнению с чувствительностью к паразитным воздействиям.

Помехи $v(t)$, сопровождающие работу любого генераторного устройства, имеют самую различную природу. Это приводит к нестабильности работы усилительного элемента в основе любого генератора, которая также зависит от вида резонансной системы, конкретной схемы генератора и типа нелинейного элемента, стабильности питающих напряжений и всех элементов схемы. Негативно влияют также нелинейная зависимость выходных параметров автогенератора (амплитуды, частоты или фазы) от выходного сигнала ИП1, различного рода шумы и помехи, дрейф нуля и пр.

Стабильность параметров колебательной системы зависит от качества сосредоточенных элементов, а также от конструкции катушек индуктивности и измерительных преобразователей [46]. К мерам по стабилизации колебательных систем автогенераторов можно отнести использование в качестве установочных материалов металлов и их сплавов со стабильными электрофизическими характеристиками; широкое применение серебряных и медных посеребренных проводов для катушек и монтажных соединений; использование высокочастотных стабильных электроизоляционных материалов для изготовления каркасов катушек индуктивности, установочных и проходных изоляторов.

Влияние дестабилизирующих факторов на частоту генерируемых колебаний сводится к изменению индуктивности и емкости колебательной системы автогенератора. При этом следует учитывать все индуктивности и емкости схемы, включая индуктивность монтажных проводов и вводов, а также междуэлектродные емкости нелинейных элементов. Поэтому включение кварцевых резонаторов в автогенераторы позволяет не только повысить стабильность измерительного режима, но и увеличить основную чувствительность к изменению контролируемого параметра, особенно в схемах, реагирующих на расстройку резонансной частоты.

Нелинейность характеристик генераторного устройства ограничивает расширение рабочего диапазона в сторону больших значений измеряемых величин. Однако погрешность, обусловленная нелинейностью, является систематической, и поэтому в некоторых пределах ее можно скомпенсировать.

К наиболее эффективным методам коррекции погрешностей, связанных с нелинейными искажениями, относится применение дифференциальных схем, а также использование узкого рабочего участка нелинейной характеристики. В последнем случае необходимо учитывать, что работа на ограниченном участке характеристики может привести к резкому сокращению рабочего диапазона, следовательно, к росту относительных значений других дополнительных погрешностей.

Статическая характеристика генераторного устройства имеет нелинейный характер, что приводит к появлению нелинейных искажений. Выбор соответствующего нелинейного элемента с учетом вида характеристики первичного измерительного преобразователя может позволить несколько снизить нелинейные искажения. Кроме этого, автогенератор, как правило, содержит цепи отрицательной обратной связи на частоте сигнала. Если генераторное устройство ГУ работает в таком диапазоне изменений выходного сигнала, в котором нелинейность статической характеристики выражена слабо, то погрешность нелинейности уменьшается пропорционально глубине отрицательной обратной связи активного элемента схемы генератора.

Генераторное устройство ГУ обычно работает, в основном, в режиме большого сигнала. Это снижает влияние случайных составляющих погрешностей, обусловленных различного рода электрическими шумами, помехами и дрейфом нуля усилителя в выходной цепи прибора. При этом под дрейфом нуля в ГУ принято понимать отклонение начального уровня амплитуды, частоты или фазы выходного сигнала под действием трудно учитываемых внешних и внутренних факторов. В частности, дрейф нуля может быть вызван старением элементов схемы, изменением температуры эксплуатации, нестабильностью источников питания и,

в конечном итоге, нестабильностью коэффициента передачи отдельных звеньев автогенератора.

Из внешних факторов, влияющих на стабильность ГУ, наибольшее значение имеют изменения питающих напряжений и температуры окружающей среды, а также изменение сопротивления нагрузки.

Наиболее эффективным средством предотвращения влияния колебаний питающего напряжения является применение стабилизированных источников питания. В транзисторных генераторах ограничиваются стабилизацией тока в эмиттерных цепях транзисторов или применением дифференциальных каскадов с общим генератором тока в цепи эмиттера [47].

Воздействие температуры изменяет начальный ток коллектора и крутизну амплитудной характеристики, сдвигая рабочую точку транзистора. Коллекторный ток и коэффициент усиления возрастают при увеличении температуры окружающей среды. Изменение коэффициента усиления, связанное со сдвигом рабочей точки, сопровождается ростом коллекторного тока. При этом коэффициент усиления изменяется значительно больше по сравнению с его непосредственным изменением при постоянном коллекторном токе i_K . Поэтому, в первом приближении, условием температурной стабильности транзисторного автогенератора можно считать равенство $di_K / dt^0 = 0$.

Однако при температуре окружающей среды ниже нуля выполнения одного этого условия недостаточно, так как более сильно проявляется непосредственная зависимость крутизны характеристики от температуры.

Статические характеристики ГУ могут изменяться в результате изменения питающих напряжений, при замене нелинейных элементов из-за разброса их параметров, за счет температурных влияний, а также из-за воздействия других факторов на параметры генератора. Влияние внешних факторов на работу генераторного устройства выражается, в основном, в воздействии на чувствительность, которая фактически является переменной величиной, зависящей от множества факторов. Согласно (2.11), погрешность измерений обратно пропорциональна чувствительности измерительного прибора к изменению контролируемого параметра.

Поэтому можно существенно повысить точность за счет правильного выбора схемы, режима работы, рабочей частоты и других параметров, чтобы максимизировать чувствительность генераторного устройства, расширить его динамический диапазон и уменьшить нелинейные искажения выходного сигнала генератора.

Для определения октанового числа бензина по трем параметрам – температуре, диэлектрической проницаемости и удельной проводимости среды – предложена следующая модель.

измерительный преобразователь в виде параллельного контура, частью которого является емкостный датчик со схемой замещения, показанной на рисунке 2.2, то при достижении баланса ($f_B = f_P$) в схеме можно записать выражение для резонансной частоты f_P в виде:

$$f_P = 1/2\pi\sqrt{L_K C_{\Pi}}, \quad (2.13)$$

где L_K – полная индуктивность колебательного контура;

C_{Π} – полная емкость измерительной цепи, определяемая выражением

$$C_{\Pi} = C_K + \frac{C_{И} \cdot C_X}{C_{И} + C_X}, \quad (2.14)$$

где C_K – емкость конденсатора колебательного контура;

C_X – емкость датчика с контролируемым материалом;

$C_{И}$ – емкость, учитывающая изоляцию электродов датчика или воздушный зазор между электродами и контролируемым материалом.

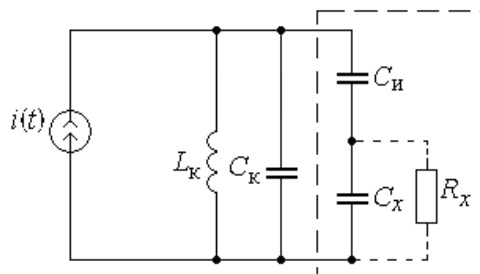


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема генераторного устройства с ИП1

В общем случае информацию об октановом числе несет емкость датчика, заполненного контролируемым материалом, которая связана с его диэлектрической проницаемостью ϵ линейным выражением [45]

$$C_X = g\epsilon\epsilon_0, \quad (2.15)$$

где g – геометрический фактор, учитывающий конфигурацию и размеры электродов датчика; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для учета зависимости емкости от температуры измеряемой среды введен коэффициент:

$$K_T C = K_{T_e} + 2K_T V, \quad (2.16)$$

Учет влияния различного рода присадок и примесей в топливе определяется выражением:

$$\epsilon'_{бенз} = \epsilon_{осн} + k_{прис} \epsilon_{прис} + k_{прим} \epsilon_{прим} = \epsilon_{бенз} K_{T_d}, \quad (2.17)$$

В результате выражение для определения неизвестной емкости измерительного преобразователя примет следующий вид:

$$C_X = K_{T_c} \cdot K_T \sigma \cdot g \cdot \epsilon'_{бенз} \cdot \epsilon_0, \quad (2.18)$$

Согласно определению, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости определяется выражением [44]

$$K_{T_e} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dT} \text{град}^{-1} \quad (2.19)$$

В связи с тем, что бензин представляет собой сложную разнородную смесь, для расчета относительной диэлектрической проницаемости сложной смеси используют эквивалентные схемы замещения [53], как отдельных компонентов, так и всего объема неоднородного диэлектрика. При этом считается, что варианты упорядоченного расположения компонентов могут быть представлены в виде их параллельного и последовательного включения. Таким образом, плоскость разде-

ла компонентов в углеводородном топливе параллельна вектору напряженности электрического поля.

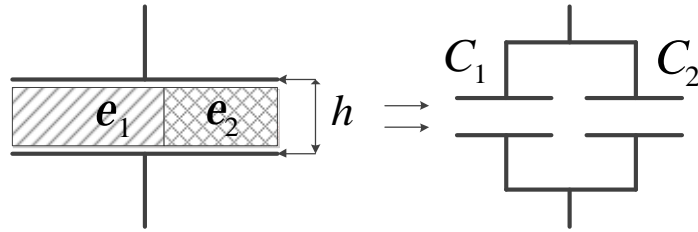


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема среды с двумя разнородными диэлектриками

Емкость двух параллельно соединенных конденсаторов для схемы замещения будет составлять

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot S_1}{h} + \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot S_2}{h} \quad (2.20)$$

При одинаковой толщине диэлектриков их объемные концентрации q составляют соответственно q_1 для первого и q_2 для второго диэлектрика:

$$q_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (2.21)$$

$$q_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \quad (2.22)$$

При этом следует считать, что $q_1 + q_2 = 1$.

Таким образом, подставив в выражения (2.19) и (2.20) в (2.18), получим

$$\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot q_1 \cdot (S_1 + S_2)}{h} + \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot q_2 \cdot (S_1 + S_2)}{h} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot (S_1 + S_2)}{h} \quad (2.23)$$

Следовательно, относительную диэлектрическую проницаемость можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\epsilon = \epsilon_1 \cdot q_1 + \epsilon_2 \cdot q_2 \quad (2.24)$$

Однако в реальных случаях бензин, рассматриваемый как разнородный диэлектрик, состоит из гораздо большего числа компонентов, поэтому и соответственно выражение (2.22) примет вид:

$$\sum_{i=1}^{i-n} q_i = 1 \quad (2.25)$$

$$e = \sum_{i=1}^{i-n} q_i \cdot e_i \quad (2.26)$$

Для последовательного соединения формула (2.22) будет иметь вид:

$$\frac{1}{e} = \frac{q_1}{e_1} + \frac{q_2}{e_2} \quad (2.27)$$

Таким образом, формулы (2.22) и (2.25) являются частным случаем формулы Лихтенеккера [45]:

$$e^x = e_1^x \cdot q_1 + e_2^x \cdot q_2 \quad (2.28)$$

где x – константа, характеризующая пространственное расположение компонентов и принимающая значение от $x = +1$ (для параллельного включения компонентов) до $x = -1$ (при последовательном расположении компонентов).

На практике чаще всего встречаются смеси, имеющие предельно разупорядоченное строение. Для них считаем, что значение x стремится к нулю, и продифференцируем выражение (2.26) по x :

$$\frac{d(e^x)}{dx} = e^x \cdot \ln e = q_1 \cdot e_1^x \cdot \ln e_1 + q_2 \cdot e_2^x \cdot \ln e_2 \quad (2.29)$$

Примем $x = 0$, тогда получится:

$$\ln e = q_1 \cdot \ln e_1 + q_2 \cdot \ln e_2 \quad (2.30)$$

Если неоднородный диэлектрик состоит более чем из двух компонентов, то выражение (2.27) примет вид:

$$\ln e = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln e_i \quad (2.31)$$

Таким образом, выражение (2.28) является справедливым для расчета диэлектрической проницаемости сложных растворов, состоящих из i -го количества компонентов.

Для хаотической смеси формула для расчета K_{T_e} получается дифференцированием уравнения (2.27) по температуре:

$$\frac{1}{e} \cdot \frac{de}{dT} = q_1 \cdot \frac{1}{e_1} \cdot \frac{de_1}{dT} + q_2 \cdot \frac{1}{e_2} \cdot \frac{de_2}{dT} = q_1 \cdot K_{T_{e_1}} + q_2 \cdot K_{T_{e_2}} \quad (2.32)$$

Разделив левую и правую части этого уравнения на e , получим:

$$K_{T_e} = q_1 \cdot K_T \frac{e_1}{e} + q_2 \cdot K_T \frac{e_2}{e} \quad (2.33)$$

Считая, что информацию о параметрах измеряемого топлива несет емкость датчика с контролируемым материалом, необходимо учитывать зависимость емкости от температуры не только измеряемой среды, но и самого измерителя. В этом случае зависимость емкости от температуры будет обусловлена не только изменением диэлектрической проницаемости, но также изменением размеров диэлектрика и его электродов:

$$C = \frac{e_0 \cdot e \cdot S}{h} \quad (2.34)$$

Продифференцируем это уравнение по температуре, затем разделим правую и левую части на емкость C . В результате получим выражение для температурного коэффициента емкости в виде:

$$K_T C = K_{T_e} + 2K_T S - K_T h, \quad (2.35)$$

где $K_T S$ и $K_T h$ – температурные коэффициенты линейного расширения металла электродов и диэлектрика соответственно.

В связи с тем, что изменение других коэффициентов входящих в формулу (2.31) чрезвычайно мало по сравнению с изменением K_{T_e} , можно считать, что температурный коэффициент изменения емкости зависит в основном только от

температурного коэффициента изменения диэлектрической проницаемости среды.

Выражение (2.18) справедливо только для контролируемой среды или материалов без активных электрических потерь. В реальных средах с активными потерями диэлектрическая проницаемость материала представляет собой комплексную величину, содержащую мнимую и реактивную составляющие и определяемую выражением:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (2.36)$$

где действительная часть ε' является функцией октанового числа, а мнимая часть определяется общими потерями: за счет активной проводимости σ (первое слагаемое) и релаксационной составляющей потерь ε''_{rel} [54]:

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} + \varepsilon''_{rel}, \quad (2.37)$$

При этом емкость датчика с материалом также будет комплексной:

$$C_X^* = C'_X - j \left(\frac{g_C \sigma}{\omega} + g_C \varepsilon''_{rel} \varepsilon_0 \right), \quad (2.38)$$

где g_C – геометрический фактор датчика в конкретной среде.

Действительная часть выражения (2.34) соответствует собственной емкости датчика C_X , показанной в схеме замещения (рис. 2.2).

Можно переписать выражение (2.34) в упрощенном виде:

$$j\omega C_X^* = j\omega C_X + G_X, \quad (2.39)$$

где эквивалентная проводимость потерь определяется выражением

$$G_X = g_C \sigma + g_C \omega \varepsilon''_{rel} \varepsilon_0 \approx g_C \sigma,$$

так как в рабочей области частот релаксационная составляющая заметной роли не играет, и потери в контролируемом материале обусловлены, в основном, активной проводимостью σ .

Полную комплексную проводимость цепи (рис. 2.2) можно записать как

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{j\omega L_K} + j\omega C_K + \frac{j\omega C_{II}(j\omega C_X + G_X)}{j\omega C_{II} + j\omega C_X + G_X} = G_{\Sigma} + jB_{\Sigma}, \quad (2.40)$$

где $G_{\Sigma} = \omega^3 L_K C_{II} G_X / \omega L_K (\omega^2 C_A^2 + G_X^2)$; $C_A = C_X + C_{II}$;

$$B_{\Sigma} = \frac{\omega^4 L_K (C_K C_A^2 + C_{II} C_X C_A) + \omega^2 (L_K C_K G_X^2 + L_K C_{II} G_X^2 - C_A^2) - G_X^2}{\omega L_K (\omega^2 C_A^2 + G_X^2)}.$$

При резонансе эквивалентная проводимость LC -контура чисто активна, следовательно, мнимую часть выражения (2.38) можно приравнять к нулю и решить полученное уравнение относительно емкости датчика C_X :

$$\omega^4 L_K (C_K C_A^2 + C_{II} C_X C_A) + \omega^2 (L_K C_K G_X^2 + L_K C_{II} G_X^2 - C_A^2) - G_X^2 = 0$$

$$C_X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.41)$$

где $a = \omega^2 - \omega^4 L_K C_K - \omega^4 L_K C_{II}$; $b = 2\omega^2 C_{II} - 2\omega^4 L_K C_K C_{II} - \omega^4 L_K C_{II}^2$;

$$c = \omega^2 C_{II} + G_X^2 - \omega^4 L_K C_K C_{II}^2 - \omega^2 L_K G_X^2 (C_K + C_{II}).$$

Значение проводимости потерь G_X , входящей в выражение (2.38), не может быть вычислено аналитическим путем с использованием формулы $G_X = g_m \sigma + g_m \omega \varepsilon_{rel}'' \varepsilon_0$. Однако информация о величине потерь G_X содержится в изменении амплитуды выходного сигнала измерительного преобразователя, так как с ростом потерь уменьшается эквивалентная добротность колебательного контура и пропорционально уменьшается максимальное значение резонансной кривой.

Выходное напряжение измерительного преобразователя с пустым емкостным датчиком (без материала) при условии $R_{\Gamma} \gg R_{\text{Э0}}$ будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ0}} = I_m R_{\text{Э0}}, \quad (2.42)$$

где $R_{\text{Э0}} = \rho \cdot Q$ – эквивалентное сопротивление колебательного контура на резонансной частоте; ρ – волновое сопротивление контура; Q – добротность контура, обратно пропорциональная проводимости потерь G_X .

Если после введения в датчик измеряемого материала активная проводимость контура увеличится на ΔG_X , то новое значение напряжения на выходе измерительного преобразователя составит:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_m / \left(\Delta G_X + 1/R_{\text{Э0}} \right), \quad (2.43)$$

откуда изменение проводимости потерь можно представить в виде

$$\Delta G_X = (U_{\text{ВЫХ0}} - U_{\text{ВЫХ}}) / U_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Э0}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Э0}}. \quad (2.44)$$

Следовательно, для оценки проводимости контролируемого материала необходимо выполнить два цифровых измерения выходного напряжения измерительного преобразователя (с пустым емкостным датчиком и после его заполнения контролируемым материалом) и реализовать простые арифметические операции вычитания (для выделения приращения выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$) и деления (для получения ΔG_X).

Таким образом итоговое выражение определяющее значение октанового числа будет равно $D(d, e, T) = \sum_{n=1}^n M_k^n e'_{\text{бенз}}$

Для выполнения таких операций в блоке обработки данных можно использовать микроконтроллер с небольшим объемом памяти, а полученные после расчета электропроводимости данные вводить в качестве поправки в результаты измерений, определяемой по емкости датчика C_X , вычисленной после измерения частоты резонансных колебаний.

В практических схемах современных измерителей октанового числа не учитываются активные потери измеряемой среды. Как отмечалось в предыдущей главе, при больших активных потерях в контролируемом материале такие измерите-

ли допускают большие погрешности, зависящие от изменения проводимости материала. Для устранения этого эффекта в следующих разделах работы предложены технические решения, учитывающие активную составляющую измеряемого углеводородного топлива, позволяющие значительно уменьшить погрешность измерения.

2.2 Оценка допустимой погрешности измерения параметров топлива с использованием модели экспрессного контроля бензина, определение граничных значений емкости в измерении

Для определения граничных значений работы предложенной модели [49,51], проанализируем взаимосвязи октанового числа, емкости измерительного преобразователя и диэлектрической проницаемости.

На основании экспериментальных данных, представленных в [141], можно построить графики зависимости октанового числа от диэлектрической проницаемости для различных видов топлива (рис. 2.4).

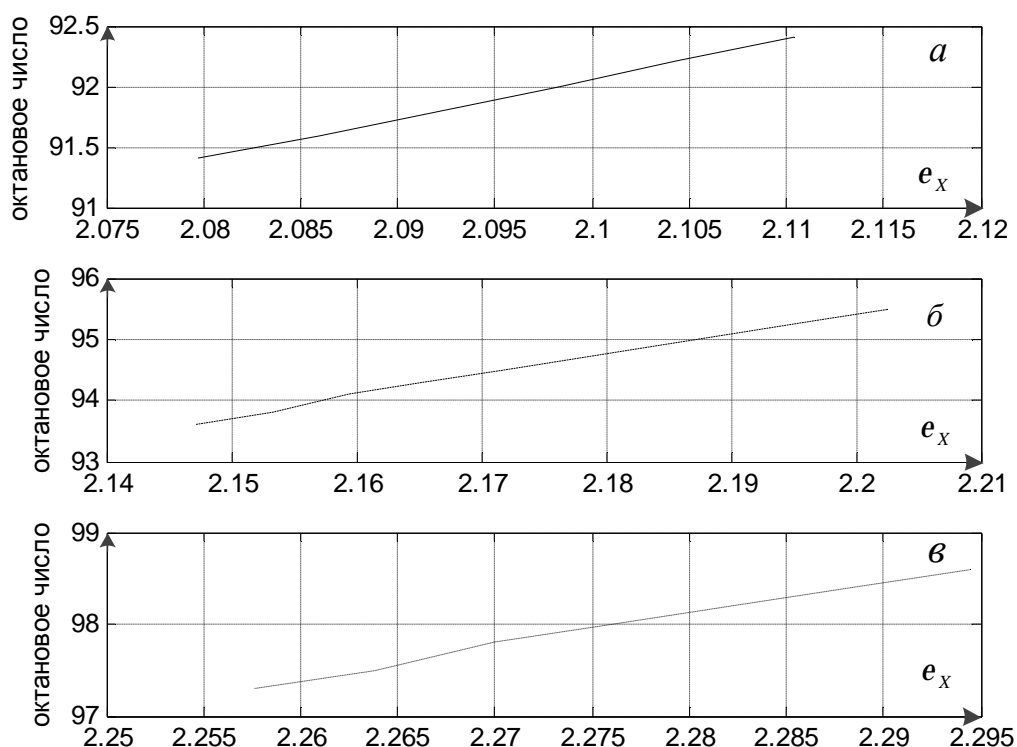


Рисунок 2.4 – Графики зависимости октанового числа от диэлектрической проницаемости, а – для 92 бензина, б – для 95 бензина, в – для 98 бензина.

Анализ графиков показывает, что граничные значения диэлектрической проницаемости для топлива с различным значением октанового числа лежит в пределах от 2,08 до 2,295. С учетом того, что нормированные значения октанового числа определяются при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$, зафиксируем значение геометрического фактора g с учетом выражения (2.16) построим график зависимости емкостного датчика от диэлектрической проницаемости. Графики представлены на рисунке 2.5

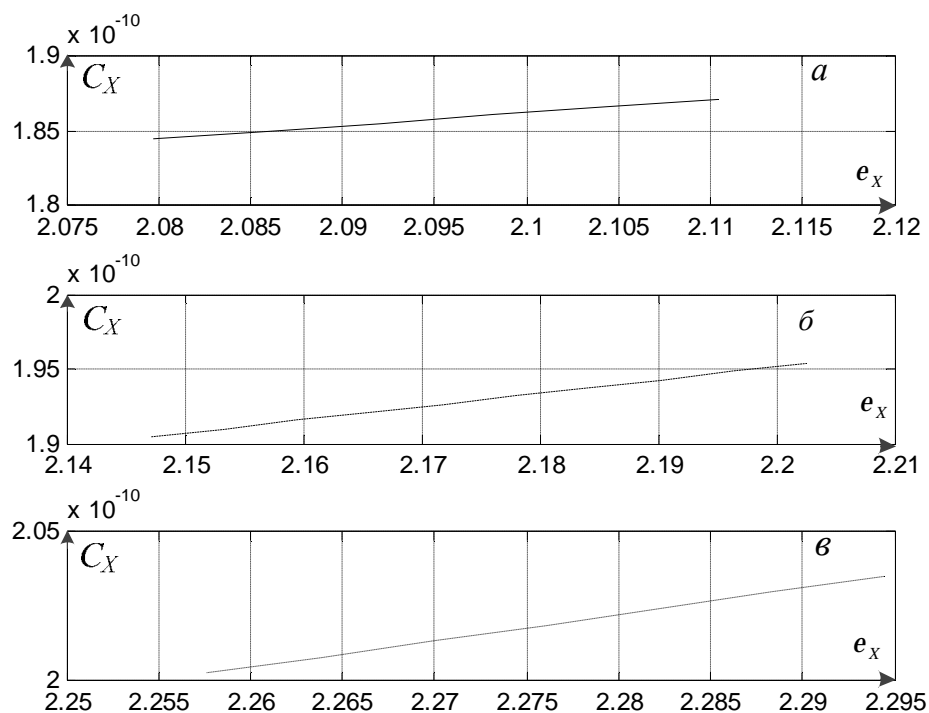


Рисунок 2.5 – Зависимости емкости измерительного преобразователя от диэлектрической проницаемости при различных значениях октанового числа, а – для 92 бензина, б – для 95 бензина, в – для 98 бензина.

Анализ графиков показывает, что емкость измерительного преобразователя для допускового контроля качества бензина лежит в пределах от 184,4 пФ до 203,5 пФ, что соответствует измеряемому диапазону октанового числа по исследовательскому методу от 92 до 98.

Возьмем среднее значение емкости датчика 190 пФ и проанализируем зави-

симось значения индуктивности колебательного контура от частоты внешнего воздействия (рис. 2.6).

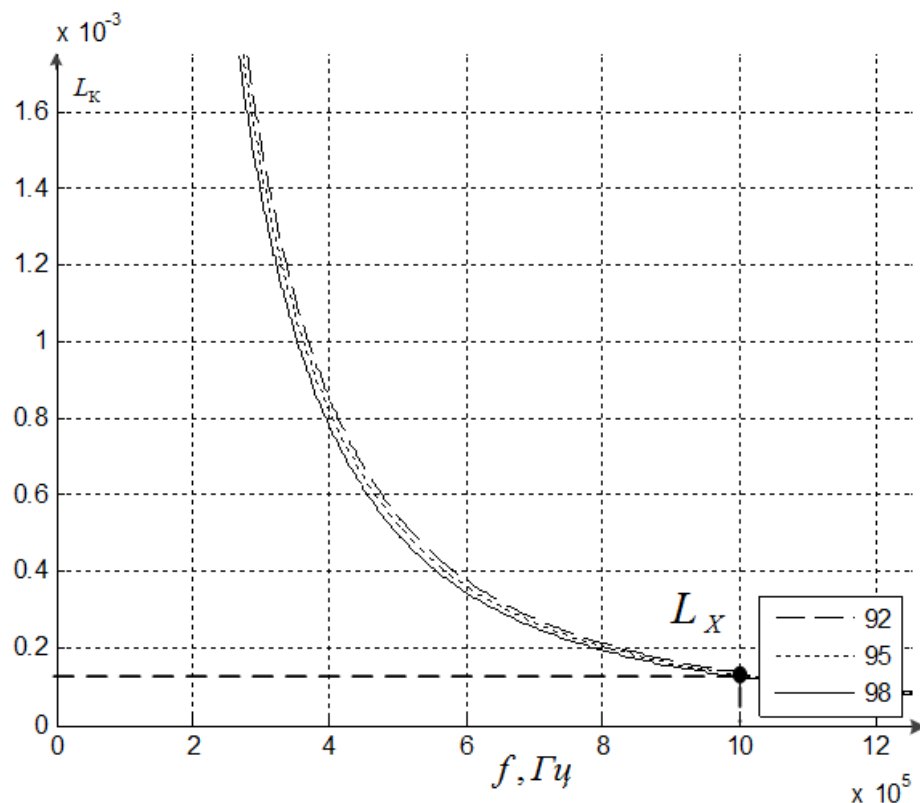


Рисунок 2.6 – График моделирования значений индуктивности для определения оптимальной частоты измерения.

Анализ графика показывает, что при принятом значении емкости колебательного контура минимально-допустимое значение индуктивности составляет 136,5 мкГн при значении частоты резонанса 1 МГц для 92 бензина, 982 кГц для 95 бензина и 956 кГц для 98 бензина соответственно.

Для определения граничных значений полосы измерения построим нормированную амплитудно-частотную характеристику емкостного датчика с учетом полученных значений индуктивности и емкости. В общем виде нормированная амплитудно-частотная характеристика колебательного контура согласно [119] определяется следующим выражением:

$$|\tilde{K}(w)| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right)^2}} \quad (2.45),$$

где $Q = \frac{w_0 C}{G}$ – добротность колебательного контура.

Графики нормированных амплитудно-частотных характеристик контура для бензинов с разным октановым числом представлены на рисунке 2.7

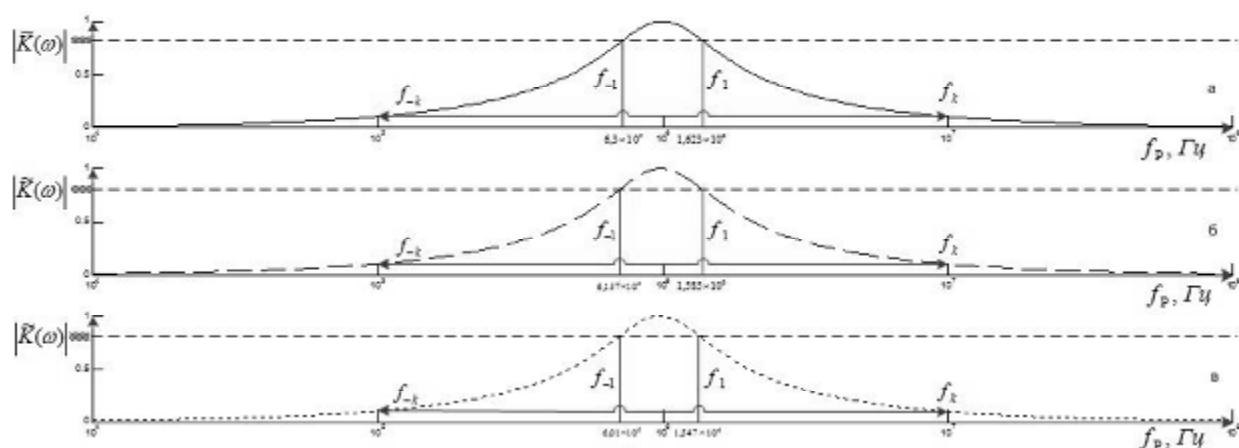


Рисунок 2.7 – Резонансные кривые:
а – для 92 бензина, б – для 95 бензина, в – для 98 бензина.

Для определения селективных свойств емкостного датчика определим коэффициенты прямоугольности полученных АЧХ. В общем случае коэффициент прямоугольности определяется следующим образом [42]:

$$K_{\Pi} = \frac{f_k - f_{-k}}{f_1 - f_{-1}} \quad (2.46)$$

где $f_1 - f_{-1}$ – ширина полосы пропускания, $f_k - f_{-k}$ – ширина полосы мешания.

Анализ графиков показывает, что значения коэффициента прямоугольности АЧХ контуров в зависимости от октанового числа топлива лежит в пределах от 10 до 12. Полученные значения соответствуют коэффициенту прямоугольности одиночного контура. Для измерения значений октанового числа с помощью одного колебательного контура без перестройки его элементов, необходимо что бы его АЧХ соответствовала обобщенной АЧХ контуров бензинов с разными октановыми числами. Данная характеристика должна иметь вид представленный на (рис. 2.8).

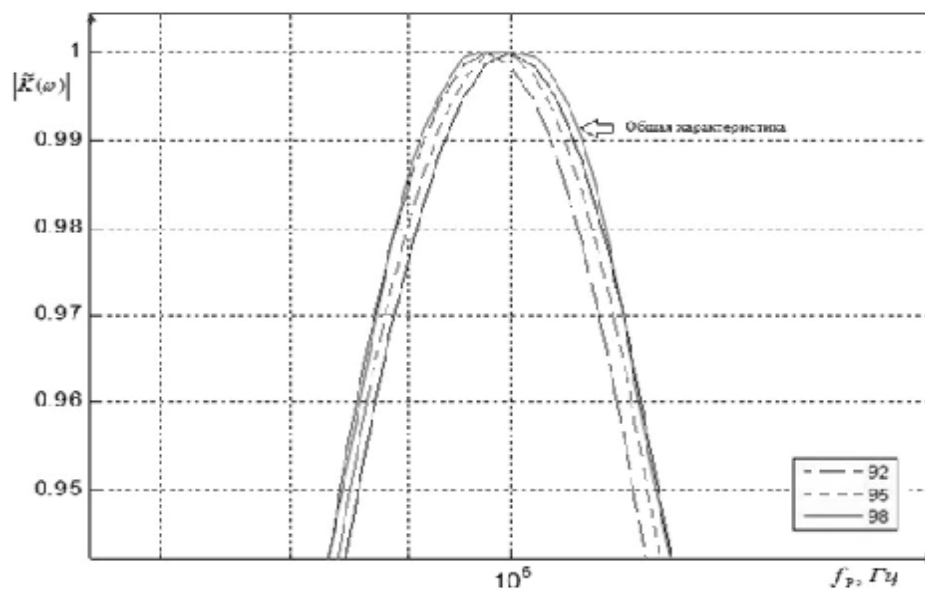


Рисунок 2.8 – Обобщенная характеристика

В этом случае полоса пропускания емкостного датчика лежит в пределах от 601 кГц до 1623 кГц, а коэффициент прямоугольности должен быть не менее 6.

В соответствии с полученными значениями граничных частот модели произведем оценку относительной погрешности моделирования на крайних значениях f_1 и f_{-1} . Подобный подход связан с тем, что вершина резонансной кривой на частоте резонанса максимально линейна и основная погрешность измерения имеет место быть по крайним значениям полосы пропускания, так как на этом участке АЧХ имеет максимальный спад.

Таким образом, значение относительной погрешности измерения для верхней границы диапазона:

$$d_{\text{в}} = \frac{C_{\text{ист}} - C_{\text{в}}}{C_{\text{ист}}} \cdot 100 \% = 0,29 \% \quad (2.47)$$

Аналогично для нижней границы диапазона, значение относительной погрешности измерения:

$$d_{\text{н}} = \frac{C_{\text{ист}} - C_{\text{н}}}{C_{\text{ист}}} \cdot 100 \% = 0,15 \% \quad (2.48)$$

Таким образом, максимальная погрешность измерения модели по обобщенной характеристике составляет 0,29 процента.

2.3 Анализ способов уменьшения погрешности измерения параметров бензина

Получить значение коэффициента прямоугольности менее десяти (по результатам исследования в предыдущем пункте) можно путем использования связанных контуров.

Характеристика, представленная на рисунке 2.8, является результатом обобщения характеристик одиночных колебательных контуров.

Для оценки погрешности измерения реального связанного колебательного контура, проведено схемотехническое моделирование устройств на ПЭВМ по программе *MULTISIM* при варьировании контролируемых *RLC*-параметров (рис. 2.9).

Для построения графиков амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик использовались модели генератора гармонических колебаний и характеристикографа (*Bode plotter*) с погрешностью моделирования менее 0,01% [106].

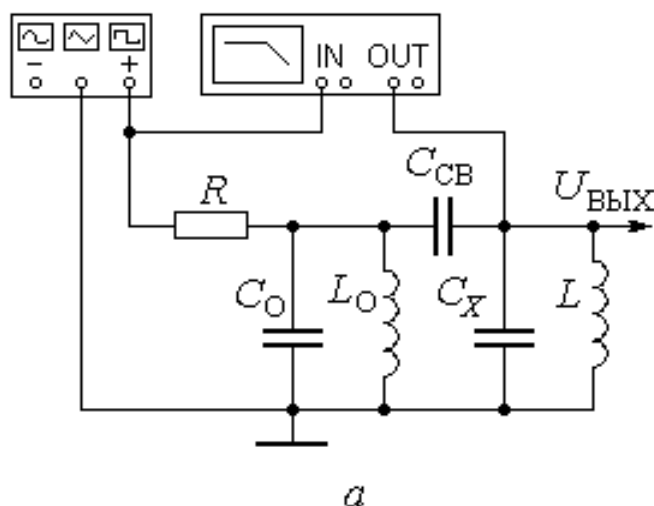


Рисунок 2.9 – Моделируемая схема

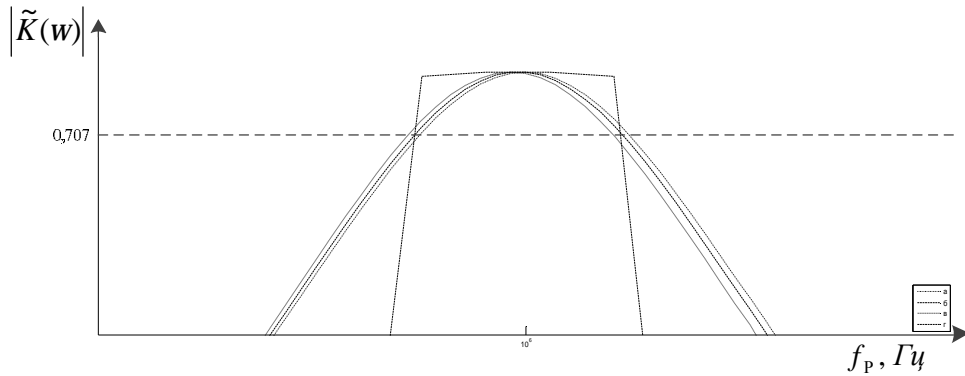


Рисунок 2.10 – АЧХ моделируемой схемы

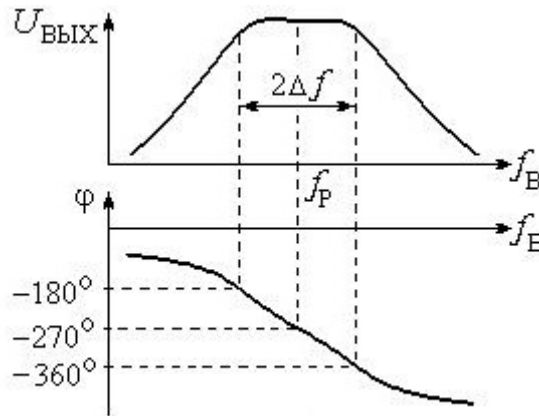


Рисунок 2.11 – ФЧХ моделируемой схемы

Согласно известным рекомендациям [57], [58], для получения наиболее плоской формы амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания конденсатор связи C_{CB} между LC -контурными при одинаковых эквивалентных параметрах образцового и рабочего преобразователей $L_0 = L$, $C_0 = C_X$ выбирался в модели (рис. 2.9) по условию $C_{CB} \approx (0,03 \dots 0,04)C_0$.

При подключении конденсатора связи C_{CB} понижается частота квазирезонанса f_p , которая отличается от частоты настройки f_0 каждого контура:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_{CB})}} \approx f_0(1 - C_{CB}/2C_0) \quad (2.49).$$

Согласно результатам моделирования (рис. 2.10), при изменении частоты возбуждающего сигнала в пределах полосы пропускания $2\Delta f$ взаимосвязанных контуров амплитуда U_m выходного сигнала остается практически постоянной, т. е. слабо зависит от частоты. При этом фаза ϕ выходного напряжения на рабочем LC -

контуре равномерно уменьшается в полосе пропускания от -180° до -360° , причем ее значение на частоте квазирезонанса f_p составляет -270° (рис. 2,8).

Следовательно, применение емкостных преобразователей в составе двух взаимосвязанных контуров позволяет обеспечить два существенных преимущества по сравнению с их подключением к отдельным LC -контурам, а именно:

- при относительно малом изменении эквивалентной емкости C_X емкостного преобразователя (в диапазоне $\Delta C_X / C_X \approx \pm 2\%$) амплитуда выходного напряжения постоянна $U_M \approx \text{const}$, что позволяет уменьшить инструментальную погрешность при последующем детектировании амплитуды;

- вдвое расширяется диапазон изменения фазы выходного сигнала емкостного преобразователя в полосе пропускания ($\Delta\varphi \approx 180^\circ$) по сравнению с диапазоном отдельного LC -контура, для которого изменение фазы в полосе пропускания лежит в пределах от $+45^\circ$ до -45° и составляет всего $\Delta\varphi \approx 90^\circ$;

- чувствительность частоты квазирезонанса взаимосвязанных контуров к изменению эквивалентных LC -параметров емкостного преобразователя аналогична чувствительности единичного резонансного контура;

- благодаря плоской форме амплитудно-частотной характеристики контуров с емкостной связью можно существенно повысить точность детектирования амплитудных значений выходного сигнала емкостного преобразователя в диапазоне изменений контролируемых параметров.

Фазовая чувствительность при использовании взаимосвязанных контуров зависит от эквивалентной добротности $Q \approx R / \sqrt{L_O / C_O}$, т. е. повышается при увеличении сопротивления R в моделируемой схеме (рис. 2.9).

В частности, при $Q = 20$ и отклонении частоты возбуждающего сигнала f_B от частоты квазирезонанса f_p на $\pm 1\%$ (что соответствует изменению эквивалентной емкости преобразователя примерно на $\Delta C_X / C_X \approx \pm 2\%$), фаза выходного сигнала преобразователя изменяется в пределах $\Delta\varphi \approx \pm 30^\circ$.

Согласно результатам моделирования, фазовая чувствительность к изменению емкостного или индуктивного параметров контура составляет

$$\Delta\varphi / (\Delta C_X / C_X) \approx \Delta\varphi / (\Delta L / L) \approx 15^\circ / \% . \quad (2.50)$$

При аналогичной девиации LC -параметров относительная чувствительность частоты квазирезонанса будет существенно ниже и составляет всего $\Delta f_p / f_p \approx 1\%$ при изменении емкости на $\Delta C_X / C_X \approx 2\%$.

Однако при дальнейшем функциональном преобразовании сигналов значительно проще реализовать высокоточное измерение частоты, а не разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами емкостного преобразователя.

Современные цифровые частотомеры среднего класса точности позволяют измерять частоту сигналов в диапазоне до 100 МГц методом прямого счета с погрешностью менее 0,01%, в то время как точность фазометров в радиочастотном диапазоне относительно невысока [59,60]. В частности, для цифрового измерения фазы сигналов на частотах выше 1 МГц в фазометрах выполняют несколько преобразований опорного и измеряемого сигналов. При этом нормируют амплитуды входных сигналов переключением коэффициентов усиления предварительных усилителей в каждом канале фазометра, выполняют аналоговое умножение входных сигналов на образцовый высокочастотный сигнал, удаляют с помощью фильтров сигналы суммарной частоты, и лишь потом выделяют и измеряют разность фаз.

Большинство перечисленных операций реализуют в аналоговой форме, поэтому погрешность измерения фазы высокочастотных сигналов достигает единиц градусов [55]. Данная погрешность зависит от отношения амплитуд сигналов в разных каналах фазометра, а также от стабильности статических и динамических параметров аналоговых устройств, в частности, предварительных фильтров. Вследствие этого для повышения точности измерений, увеличения помехоустойчивости, уменьшения сложности и стоимости аппаратуры контроля целесообразно реализовать цифровое измерение частоты квазирезонанса, а не разности фаз высокочастотных сигналов [56,80].

Согласно полученной при моделировании зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = F(f_{\text{В}})$ (рис. 2.10), амплитудно-частотная характеристика взаимосвязанных контуров имеет плоскую форму в полосе пропускания. Поэтому для выделения частоты квазирезонанса $f_{\text{Р}}$ нужно дополнительно измерять фазу выходного сигнала и выделять момент ее перехода через расчетное значение $\varphi = -270^\circ$. Однако даже использование современной элементной базы и быстродействующих цифровых микросхем не позволяет обеспечить погрешность измерения фазы ниже $\pm 1^\circ$. Вследствие этого необходимо изменить алгоритм преобразования, чтобы повысить чувствительность устройства контроля.

Реальная возможность улучшения фазовой чувствительности проверена моделированием модифицированной схемы (рис. 2.11) с установкой LC -параметров аналогично параметрам элементов предыдущей модели.

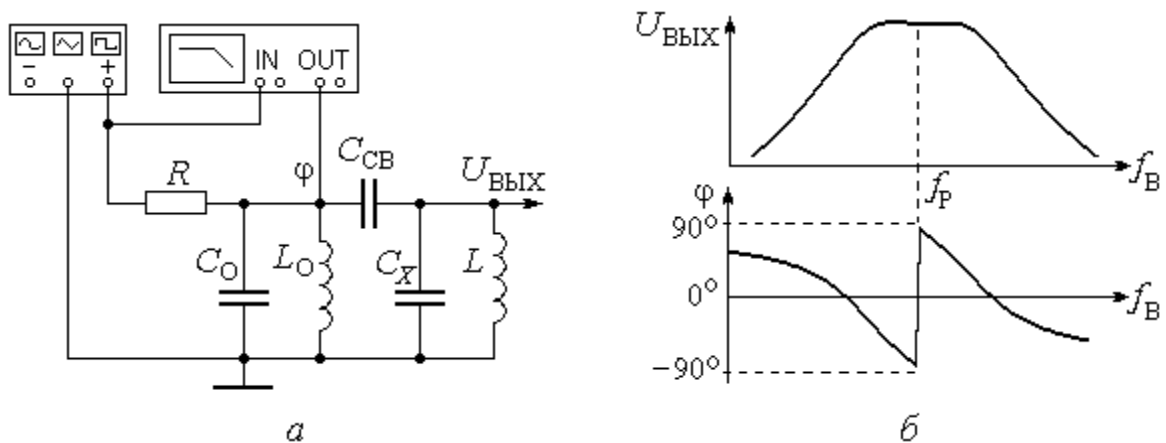


Рисунок 2.12 – Улучшенная схема (а) и ее частотные характеристики (б)

В результате проведенного моделирования установлено, что при аналогичной плоской форме амплитудно-частотной характеристики выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}} = F(f_{\text{В}})$ наблюдается резкое, практически вертикальное изменение фазы сигнала на выходе образцового преобразователя на частоте квазирезонанса $f_{\text{Р}}$ в пределах от -85° до $+85^\circ$ (рис. 2.12, б). При этом фаза переходит через нулевые значения не только на частоте квазирезонанса $f_{\text{Р}}$, но и на границах полосы пропускания резонансного контура. Следовательно, в устройстве контроля октанового числа бензина

на взаимосвязанных контурах нужно выполнять измерение амплитуды напряжения на выходе рабочего преобразователя, а фазовый угол выделять по сигналу на выходе образцового преобразователя. При этом можно сравнительно просто определить частоту квазирезонанса по изменению знака фазы, а не по ее цифровому значению. Такой алгоритм работы позволяет заменить процесс измерения фазы операцией ее сравнения с нулевым уровнем. При этом отклонение порогов срабатывания фазового компаратора в несколько угловых градусов и даже больше не будет оказывать существенного влияния на точность выделения частоты квазирезонанса f_p вследствие большой крутизны фазочастотной характеристики $\varphi = F(f_B)$ на этой частоте f_p .

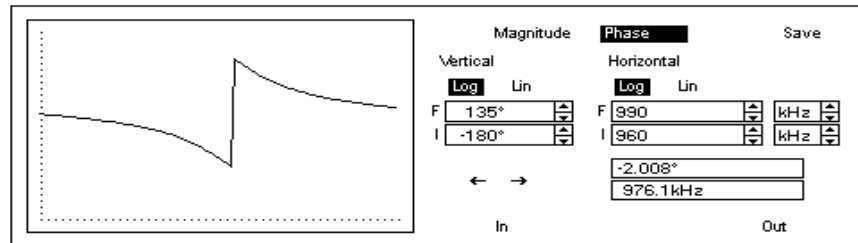
Учитывая важность полученных результатов для целей измерения, проведено детальное исследование данной схемы с вариацией на модели ее основных параметров (номиналов применяемых элементов и добротности LC -контуров). Также выполнена оценка фазочастотной чувствительности к изменению эквивалентной емкости C_X рабочего преобразователя, применяемого в составе второго LC -контура (рис. 2.12, *a*).

В практическом плане, с учетом возможного ухудшения добротности резонансной системы в реальных условиях повышенной активной проводимости контролируемых материалов, исследование формы фазочастотной характеристики и фазовой чувствительности к изменению эквивалентной емкости C_X преобразователя проведено при значении добротности контура $Q = 6$.

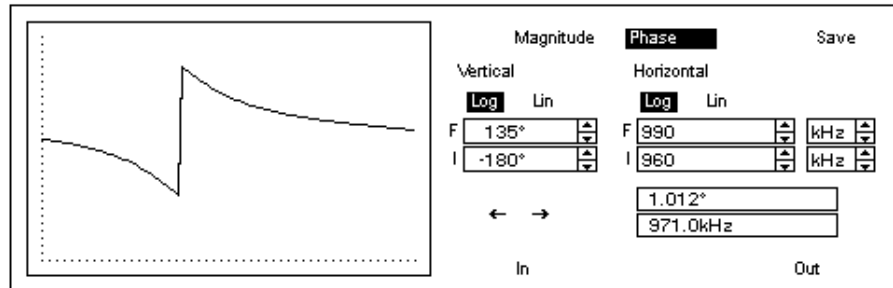
В результате проведенного моделирования при таких условиях выявлено несколько интересных особенностей.

При моделировании в *MULTISIM* границы частотного диапазона в схеме задавались трехзначным числовым значением (близким к числу «999»). Это позволило уменьшить погрешность моделирования до уровня менее 0,1%. Ширина диапазона исследования фазы на характериографе также выбиралась несколько шире предельно возможных значений, что позволило повысить точность моделирования фазовых параметров при снятии фазочастотной характеристики.

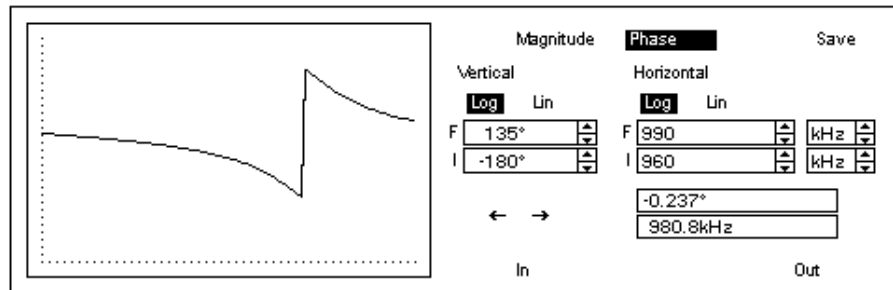
С учетом данных положений и установке параметров $L_O = L = 130$ мкГн, $C_O = C_X = 200$ пФ, $C_{CB} = 6,2$ пФ, $R = 10$ кОм проведено моделирование предыдущей схемы (рис. 2.12, а), результаты которого показаны на рисунке 2.13.



а



б



в

Рисунок 2.13 – Результаты моделирования при емкости $C = 200$ пФ (а), при ее увеличении на 1 % (б) и уменьшении на 1 % (в)

Согласно полученным данным, увеличение эквивалентной емкости рабочего контура на $\Delta C_X / C_X = +1$ % относительно начального значения приводит к уменьшению частоты квазирезонанса на $\Delta f_P = 4,9$ кГц или на значение $\Delta f_P / f_P \approx 0,50$ % относительно исходного значения $f_P = 982$ кГц.

При понижении емкости на $\Delta C_X / C_X = -1\%$ частота квазирезонанса повышается на $\Delta f_p = 5,1$ кГц или, соответственно, на $\Delta f_p / f_p \approx +0,52\%$. При использовании взаимосвязанных контуров зависимость отклонения частоты Δf_p от изменения емкости C_X в диапазоне до $\pm 10\%$ остается практически линейной, т. е. относительная чувствительность изменяется незначительно.

Таким образом, анализ результатов моделирования схемы представленной на рисунке 2.9 позволяет, без учета влияния активной проводимости контура, сделать вывод о том, что погрешность модели ограничивается только погрешностью на краях диапазона полосы измерения и составляет 0,29%.

При этом применение связанных контуров при контроле октанового числа дает ряд преимуществ [88]:

- повышение частоты возбуждающего сигнала вплоть до десятков мегагерц не оказывает существенного влияния на фазовую погрешность, так как при высокой добротности связанных контуров процесс измерения фазы заменяется простым сравнением фазы с нулевым или опорным значением;

- высокая крутизна фазочастотной характеристики на частоте квазирезонанса позволяет снизить требования к чувствительности и ширине зоны гистерезиса фазовых компараторов и тем самым повысить диапазон частот при контроле;

- чувствительность частоты квазирезонанса взаимосвязанных контуров к изменению эквивалентных LC -параметров емкостного преобразователя аналогична чувствительности единичного резонансного контура;

- благодаря плоской форме амплитудно-частотной характеристики контуров с емкостной связью можно существенно повысить точность детектирования амплитудных значений выходного сигнала емкостного преобразователя в диапазоне изменений контролируемых параметров.

С учетом перечисленных преимуществ, при разработке резонансных измерителей октанового числа, целесообразно использовать схему построения приборов на связанных контурах.

2.4 Анализ способов уменьшения влияния проводимости контура на точность контроля параметров бензина

Возможность измерения истинной емкости первичного преобразователя с помощью различных схемных модификаций, использующих явление резонанса в колебательном контуре, принципиально ограничена определенной величиной потерь, вносимых преобразователем в контур. При большой электропроводности материала, находящегося в электрическом поле преобразователя, включенного в колебательный контур, нарушаются условия самовозбуждения автогенератора, и измерительная схема становится неработоспособной. Для увеличения нагрузочной способности контура довольно часто электроды емкостного датчика покрывают изоляционным покрытием, что эквивалентно включению датчика в контур последовательно с разделительной емкостью. Это является одним из способов ослабления влияния проводимости контролируемого материала [75,93]. В действительности такой прием может не ослаблять, но, напротив, усугубить влияние проводимости на точность измерения, если не учитывать реальных факторов.

Для устранения такого влияния необходимо использовать способы измерения, позволяющие разделять активную и реактивную составляющие полного сопротивления контура. Для устранения такого влияния необходимо использовать способы измерения, позволяющие разделять активную и реактивную составляющие полного сопротивления контура.

Изменение частоты возбуждающего сигнала, подаваемого на резонансный измерительный двухполюсник в цикле измерения, позволяет расширить диапазон контроля октанового числа. Генераторы с автоматической регулировкой частоты колебаний (гетеродины) широко применяются в радиотехнических и телевизионных устройствах. На современном этапе такие генераторы можно реализовать на кварцевых генераторах и цифровых счетчиках импульсов с переключаемыми коэффициентами деления частоты [99].

При возбуждающем сигнале импульсной формы можно исключить формирователи импульсов из гармонических сигналов во входных цепях фазовых ком-

параторов в приборах допускового контроля октанового числа углеводородного топлива.

Однако в приборах допускового контроля с подключением эталонного и рабочего датчиков к резонансным LC -контурам выходное напряжение резонансных емкостных преобразователей имеет синусоидальную форму вследствие фильтрующих свойств применяемых LC -контуров. Поэтому для выделения разности фаз необходимо сформировать из двух гармонических сигналов импульсы прямоугольной формы [63,100].

В итоге процесс измерения разности фаз $\Delta\varphi$ сводится к выделению интервалов времени $t_{\text{И}}$ между моментами перехода двух гармонических сигналов через нулевое значение и их последующего измерения (рис. 2.14).

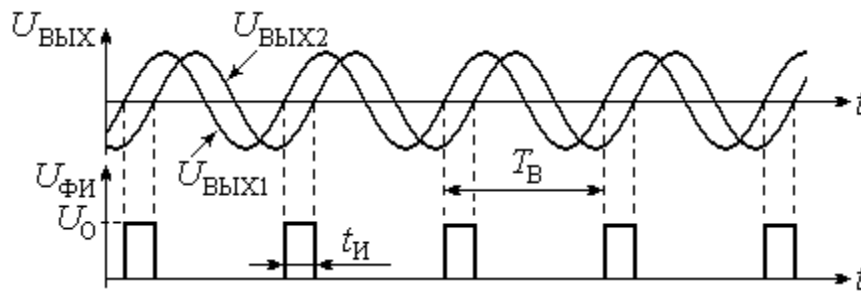


Рисунок 2.14 – Выделение разности фаз сигналов на частоте $f_{\text{В}} = \text{const}$

При постоянной частоте $f_{\text{В}}$ или периоде $T_{\text{В}}$ возбуждающего сигнала проще всего вычислять среднее значение импульсного напряжения на интервале измерения $T_{\text{ИЗМ}} \gg T_{\text{В}}$ в аналоговом виде. Например, при постоянной амплитуде импульсов, задаваемой источником опорного напряжения $U_{\text{О}}$, среднее значение напряжения за период $T_{\text{В}}$ будет прямо пропорционально измеряемой разности фаз в соответствии с выражением

$$U_{\text{СР}} = U_{\text{О}} t_{\text{И}} / T_{\text{В}} = U_{\text{О}} t_{\text{И}} f_{\text{В}} = \Delta\varphi U_{\text{О}} / 360^{\circ}, \quad (2.51)$$

поэтому разность фаз $\Delta\varphi$ линейно зависит от среднего значения напряжения:

$$\Delta\varphi = 360^{\circ} U_{\text{СР}} / U_{\text{О}}. \quad (2.52)$$

Несмотря на линейность характеристики преобразования, погрешность аналоговых фазометров обычно составляет $\pm(1...3)^\circ$ из-за нестабильности уровней срабатывания и зоны гистерезиса формирователей импульсов.

Кроме того, такие фазометры характеризуются относительно большим временем измерения, составляющим $T_{\text{изм}} \approx (0,5...1,0)$ с, уменьшение которого приводит к нестабильности показаний из-за недостаточного сглаживания или фильтрации среднего значения напряжения. Перечисленные недостатки не позволяют применять аналоговые фазометры для измерения мгновенных значений фазы выходных сигналов емкостных преобразователей при изменяющейся во времени частоте возбуждающих импульсов.

Подобные ограничения по быстродействию имеют и цифровые фазометры, которые отличаются от аналоговых только тем, что импульсы длительностью $t_{\text{и}}$, выделяемые формирователями, заполняются тактовым сигналом высокой частоты $f_{\text{T}} \gg 1/t_{\text{и}}$, поэтому на результат измерения не оказывает влияния стабильность амплитуды U_0 импульсов [81].

Особенности цифрового измерения разности фаз гармонических сигналов с изменяющейся частотой $f_{\text{В}}$ можно рассмотреть на временных диаграммах входных и выходного сигналов двух формирователей и счетчика (рис. 2.15).

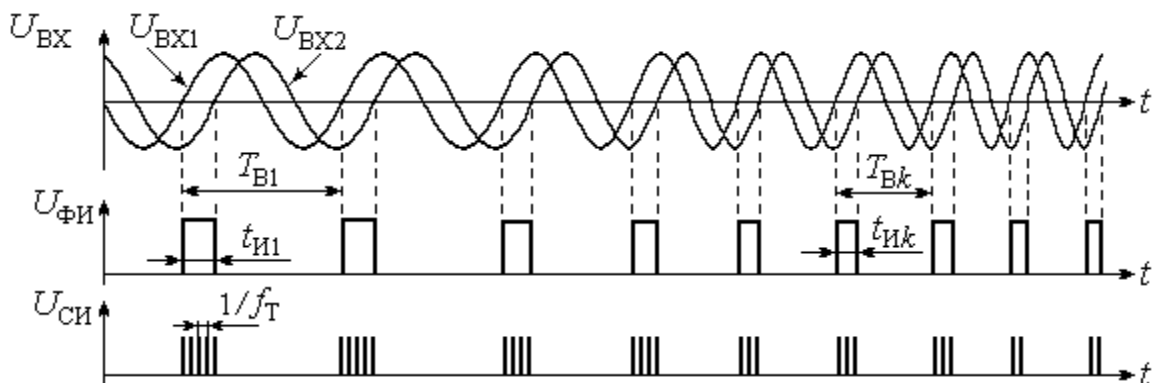


Рисунок 2.15 – Цифровое измерение фазы при изменяющейся частоте $f_{\text{В}}$

Нарастание частоты возбуждающего сигнала f_B приводит к пропорциональному уменьшению длительностей k -го импульса $t_{ик}$ и k -го периода T_{Bk} выходных напряжений емкостных преобразователей (рис. 2.15).

Для цифрового измерения фазы φ_k сигналов в каждом k -том периоде нужно одновременно заполнять тактовыми импульсами высокой частоты f_T интервал $t_{ик}$ и суммировать эти импульсы в течение длительности периода T_{Bk} , а затем вычислять отношение двух кодов $N_{ик} = f_T t_{ик}$ и $N_{Tk} = f_T T_{Bk}$ для получения результата цифрового преобразования по выражению

$$\Delta\varphi = 360^\circ t_{ик} / T_{Bk} = 360^\circ N_{ик} / N_{Bk}. \quad (2.53)$$

При таком преобразовании уменьшение длительностей импульса $t_{ик}$ и периода T_{Bk} по мере возрастания частоты возбуждающего сигнала f_B приводит к повышению погрешности дискретности, абсолютное значение которой можно выразить через нестабильность фазы $\Delta\varphi_k$ соотношением

$$\Delta\varphi_k \approx \pm 360^\circ / (f_T T_{Bk}). \quad (2.54)$$

Например, при частоте возбуждающего сигнала $f_B = 1$ МГц и заполнении импульсов длительностью $t_{ик}$ тактовой частоте $f_T = 120$ МГц цифровое измерение разности фаз $\Delta\varphi_k$ выполняется с максимальной погрешностью дискретности, составляющей $\Delta\varphi_k \approx \pm 360 f_B / f_T \approx 360 / 120 = \pm 3^\circ$.

При случайном процессе изменения фазы выходного сигнала емкостного преобразователя дисперсия σ^2 уменьшается с расширением полосы пропускания $2\Delta f$ резонансного LC -контура, и тем самым можно повысить соотношение «сигнал/шум» резонансного емкостного преобразователя [31]:

$$\sigma^2 \approx K_{ПК} / 2\Delta f T_{ИЗМ}, \quad (2.55)$$

где $K_{ПК} \approx 0,5$ – коэффициент прямоугольности контура; $T_{ИЗМ}$ – время измерения.

Для контура с резонансной частотой $f_P = 1$ МГц, добротностью $Q = 200$ и полосой пропускания $2\Delta f = 5$ кГц дисперсия составляет $\sigma^2 \approx 0,01$ при времени из-

мерения $T_{\text{изм}} = 10$ мс. При сужении полосы пропускания до уровня $2\Delta f = 1$ кГц дисперсия понижается до $\sigma^2 \approx 0,005$ при $T_{\text{изм}} = 100$ мс.

Применение резонансного режима работы эталонного и рабочего емкостных преобразователей в составе двух взаимосвязанных LC -контуров позволяет увеличить точность измерения фазы выходного сигнала в расширенной частотной полосе пропускания за счет уменьшения дисперсии σ^2 и повысить достоверность результатов контроля.

В классических устройствах измерения октанового числа бензина принято учитывать изменение амплитуды выходного сигнала датчика. Но изменение амплитуды можно исключить из результатов измерений, если стабилизировать ее на фиксированном уровне применением отрицательной обратной связи между выходным и возбуждающим сигналами датчиков. При этом параметры, характеризующие октановое число, можно определять по изменению фазы или частоты сигнала, снимаемого с резонансного датчика.

В этом случае необходимо только точно определять изменение фазы выходного сигнала емкостного преобразователя относительно импульсов возбуждающего напряжения, имеющих постоянную амплитуду [62,76].

Для повышения точности измерения октанового числа бензина емкостным резонансным датчиком предлагается использовать новый способ. Повышение точности измерений в предлагаемом способе обеспечивается за счет компенсации влияния электрической проводимости бензина на результаты измерения его октанового числа, что обеспечивается в оригинальной схеме генератора с двумя выходами, собранного на полевом транзисторе [61].

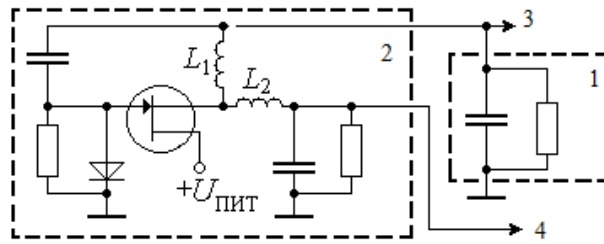


Рисунок 2.16 – Схема предлагаемого генератора.

Где, 1 – измерительный преобразователь, 2 – генератор, 3 первый выход генератора, 4- второй выход генератора.

Предложенный генератор отвечает следующим требованиям:

1) амплитуда выходного сигнала ограничивается на максимальном уровне $U_M \leq 2$ В за счет включения кремниевого диода VD в цепи затвора полевого транзистора;

2) применение оригинального схемотехнического решения позволяет ограничить постоянный ток питания генератора на микроамперном уровне и тем самым повысить температурную стабильность частоты выходных колебаний при изменении напряжения питания генератора. Кроме того, при этом резистивно-емкостном фильтре формируется напряжение, прямо пропорциональное электрической проводимости бензина.

При оценке качества топлива по резонансной частоте проводимость материала приводит к ухудшению добротности колебательной системы. Зависимость резонансной частоты от емкости датчика (2.13) справедлива для идеальных колебательных систем, добротность которых бесконечно велика. В реальных условиях контроля октанового числа это выражение принимает вид:

$$f'_p = \frac{\sqrt{1-1/4Q_\Sigma^2}}{2p\sqrt{L_k C_{\Pi}}} = f_p \sqrt{1-1/4Q_\Sigma^2}, \quad (2.56)$$

где Q_Σ – эквивалентная добротность контура с учетом электропроводности.

Следовательно, измеряемое значение частоты f'_p отличается от резонансного f_p , в которой скрыта емкость датчика C_X и, соответственно, значение кон-

тролируемого параметра. При этом в результаты измерений вносится дополнительная погрешность, которую можно записать в следующем виде:

$$\gamma = \frac{\Delta f_P}{f_P} = \frac{f_P - f'_P}{f_P} = 1 - \sqrt{1 - 1/4Q_{\Sigma}^2} \quad (2.57)$$

Анализ полученного выражения показывает, что выделение резонансной частоты на выходе емкостного датчика по максимальному значению его амплитуды приводит к методической погрешности. При повышении электропроводности контролируемого материала (при малых значениях эквивалентной добротности $Q_{\Sigma} \leq 1 \dots 2$) такая погрешность достаточно велика и может быть соизмерима с нормируемым значением, определяемым соответствующим стандартом [134].

Для компенсации данной погрешности предлагается выделению частоты резонанса по нулевой разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами резонансного емкостного датчика. Сущность данного способа заключается в том, что уменьшение добротности резонансного контура приводит только к смещению максимума резонансной кривой, в то время как нулевое значение фазового параметра полностью соответствует частоте резонанса и не зависит от изменения добротности. В частности, аналитическое выражение для фазовой характеристики контура можно записать в следующем виде [83]

$$\Delta j = -\arctg(2Q_{\Sigma}\Delta f / f_P), \quad (2.58)$$

где Δf – отклонение частоты возбуждающего сигнала от частоты резонанса.

Согласно (2.54), уменьшение добротности Q контура приводит только к уменьшению крутизны фазочастотной характеристики в окрестности частоты резонанса, в то время как нулевое значение разности фаз $\Delta\phi = 0$ между возбуждающим и выходным сигналами резонансного емкостного датчика соответствует нулевому отклонению частоты Δf от резонансного значения.

Вследствие этого выделение момента наступления резонанса по нулевой разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами позволяет исключить методическую погрешность измерения, возникающую из-за влияния потерь в контролируемом материале. Предложенный способ диэлькометрического резо-

нансного контроля позволяет теоретически исключить методическую погрешность измерения октанового числа топлива, поэтому при разработке структур построения и реализации алгоритмов контроля основное внимание целесообразно уделить способам снижения инструментальных погрешностей преобразования приборов.

Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель процесса измерения диэлектрической проницаемости бензина, основанная на методе частотного резонанса, которая отличается учетом удельной электрической проводимости контролируемого топлива и его температуры с определением частоты резонанса по смене знака фазы выходного сигнала емкостного датчика.

2. В результате теоретических исследований установлены диапазоны изменения диэлектрической проницаемости для бензинов марки АИ-92, АИ-95, АИ-98, которые составляют от 2,08 до 2,295. Предельные значения емкости емкостного датчика для допускового контроля бензина изменяется в диапазоне от 184 до 203,5 пФ.

3. Исследованы АЧХ, колебательной системы в которую входит измерительный преобразователь по определению диэлектрической проницаемости, определены ее граничные частоты 601 кГц и 1623кГц и установлена частота измерения (1 МГц).

4. В результате теоретических исследований установлено, что с целью снижения методической погрешности определения резонансной частоты измерительного преобразователя необходимо выполнять расчет октанового числа по результатам измерений амплитудно-частотных или амплитудно-фазовых параметров сигналов.

5. В результате исследования выполненного с помощью разработанной модели, установлено, что необходимым условием для уменьшения методической погрешности определения резонансной частоты контура является применение резонансного режима работы эталонного и рабочего преобразователя в системе связанных контуров.

6. С целью разработки алгоритма, позволяющего снизить инструментальную погрешность при диэлькометрическом контроле бензина необходимо исследовать особенности построения калибровочных характеристик по удельной проводимости и температуре для бензинов марок АИ 92, АИ 95, АИ 98.

ГЛАВА 3 – РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ БЕНЗИНА

3.1 Разработка функциональной схемы прибора экспрессного контроля октанового числа бензина

В соответствии с разработанной математической моделью (раздел 2.1) процесс экспрессного контроля параметров бензина сводится в конечном итоге к оценке параметров диэлектрической проницаемости с коррекцией данного значения с учетом температуры и активной проводимости и включает в себя следующие этапы:

- преобразование контролируемых параметров в частотно-зависимые величины;
- воздействие контролируемых параметров на генераторное устройство работающее в стационарном режиме;
- измерение частоты выходного напряжения генераторного устройства;
- оценка по частоте выходного напряжения измеренного значения.

Функциональная схема прибора экспрессного контроля топлива с возможностью компенсировать погрешности измерений при влияниях мешающих факторах представлена на рисунке 3.1.

Функционально ИП1 входит в состав генераторного устройства (рис. 3.1) и выполнен в виде цилиндрического конденсатора, в качестве диэлектрика которого выступает измеряемое топливо.

На выходе генераторного устройства формируется две величины (3.1) и (3.2), которые в блоке обработки данных позволяют определить значение активной проводимости измеряемого топлива и значение диэлектрической проницаемости топлива находящегося в емкостном датчике.

$$f_e(e_x) = f_{e.real}(e_x) / \sqrt{1 - \frac{(L_1 + L_2) \cdot U_p^2}{4R_\phi^2 C_x (U_{отс} - U_p)^2}} \quad (3.1)$$

$$U_p = U_{отс} R_\phi / (R_\phi + R_x) \quad (3.2)$$

Полупроводниковый датчик температуры ИП2 формирует на выходе

напряжение, пропорциональное температуре измеряемой жидкости.

Корректировка конечного значения октанового числа осуществляется в блоке обработки данных (БОД) измерительного устройства.

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), осуществляет преобразование $U_T(T_x)$ в импульсные колебания прямоугольной формы, частота которых пропорциональна изменению температуры контролируемого топлива.

Генератор управляемым напряжением (ГУН) построен по известной схеме представленной в [82], и осуществляет преобразование $U_T(T_{бенз})$ в импульсные колебания прямоугольной формы, частота которых пропорциональна изменению температуры топлива.

Гармоническое колебание подается на формирователь импульсов (ФИ), где происходит его преобразование в прямоугольную форму [84].

С целью расширения диапазона контроля целесообразно использовать дополнительный опорный генератор (ОГ). Частота импульсов ОГ устанавливается большей на 10 % выше начальной частоты колебаний ГУ при условии не заполнения ИП1:

$$f_{OG} \geq 1,1 \times f_e(e_x) \quad (3.3)$$

где f_{OG} – значение частоты на выходе ОГ.

Импульсы прямоугольной формы с выхода ФИ поступают на блок вычитания частот [85] (БВЧ). Импульсы образцовой частоты от кварцевого генератора подаются на второй вход блока вычитания частот, на выходе которого формируются импульсы разностной частоты Δf .

В этом случае разностная частота на выходе блока вычитания частот составит:

$$\Delta f = f_{OG} - f_e(e_x) \approx 0,1 \times f_e(e_x) \quad (3.4)$$

В случае увеличение емкости датчика на 1 % приведет к относительному изменению частоты на выходе блока вычитания частот на величину на приблизительно равную 2,5 %, т.е. в пять раз больше, чем при непосредственном измере-

3.2 Определение корректирующих температурных коэффициентов при измерении диэлектрической проницаемости бензина

При измерении диэлектрической проницаемости бензина, необходимо вносить коррекцию численного значения диэлектрической проницаемости от температуры измеряемого топлива. Экспериментальная зависимость диэлектрической проницаемости от температуры измерения представлена в [75]. В связи с тем, что ГОСТ не оговаривает строгим образом зависимость диэлектрической проницаемости от температуры измерения, а также не регламентирует полный набор добавок и присадок для каждого вида бензина, следует считать, что данные представленные в качестве экспериментальных не могут являться основой для коррекции всех видов существующего топлива в процессе измерения. Так же в связи с различным компонентным составом бензинов, выпускаемым разными нефтеперерабатывающими заводами, получение наиболее точного результата возможно только в случае предварительной калибровки измерительного прибора под измеряемое топливо.

Наиболее приемлемым методом построения калибровочных характеристик, является нелинейный регрессивный анализ, а в частности метод наименьших квадратов [70,71] который позволяет получить, полином вида:

$$f(x) = a_1x + a_2x + \dots + a_nx + b \quad (3.5)$$

где a_1, a_2, a_n - являются коэффициентами характеризующими полином и как следствие зависимость, b является константой.

В связи с тем, что зависимость диэлектрической проницаемости от температуры носит, характер приближенный к линейному, описать данную зависимость можно линейным многочленом вида [96]:

$$f(x) = ax + b \quad (3.6)$$

Полученные экспериментальные данные представляют собой два массива данных вида:

$$t^0 c[t_1, \dots, t_i], e[e_1, \dots, e_i] \quad (3.7)$$

Запишем для данного случая систему:

$$\begin{cases} a \sum_{i=0}^n t_i + (n-1)b = \sum_{i=0}^n e_i \\ a \sum_{i=0}^n t_i^2 + t_i = \sum_{i=0}^n t_i e_i \end{cases} \quad (3.8)$$

При этом будем считать что, $M_t = \sum_{i=0}^n t_i$, $M_e = \sum_{i=0}^n e_i$, $M_{te} = \sum_{i=0}^n t_i e_i$,

$$M_{t^2} = \sum_{i=0}^n t_i^2, \quad M_{t^2e} = \sum_{i=0}^n t_i^2 e_i.$$

Вычислим определитель, определитель первого и второго порядка соответственно:

$$D = \begin{bmatrix} M_t & n+1 \\ M_{t^2} & M_t \end{bmatrix} = (M_t)^2 - (n+1)M_{t^2} \quad (3.9)$$

$$D1 = \begin{bmatrix} M_e & n+1 \\ M_{te} & M_e \end{bmatrix} = M_t M_e - (n+1)M_{te} \quad (3.10)$$

$$D2 = \begin{bmatrix} M_t & M_e \\ M_{t^2} & M_{te} \end{bmatrix} = M_t M_{te} - M_{t^2} M_e \quad (3.11)$$

Следовательно, значения коэффициентов будут иметь вид:

$$a = \frac{D1}{D}; b = \frac{D2}{D} \quad (3.12)$$

Проведем вычисления в среде *MathCad* [72]. Для существующих экспериментальных данных получим значения коэффициентов. Экспериментальные данные зависимости диэлектрической проницаемости от температуры для бензина АИ-92, АИ-95, АИ-98 представлены в таблицах 2, 3, 4, соответственно.

Таблица 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для АИ-92.

Температура ($t^{\circ}C$)	Диэлектрическая проницаемость (ϵ)
0	2,11043
10	2,10429
20	2,09816
30	2,09202
40	2,08589
50	2,07975

Таблица 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для АИ-95.

Температура ($t^{\circ}C$)	Диэлектрическая проницаемость (ϵ)
0	2,17791
10	2,17178
20	2,16564
30	2,15951
40	2,15337
50	2,14724

Таблица 4 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для АИ-98.

Температура ($t^{\circ}C$)	Диэлектрическая проницаемость (ϵ)
0	2,28834
10	2,28221
20	2,27607
30	2,26994
40	2,2638
50	2,25767

Пример расчёта значений коэффициентов в системе MathCad приведен в приложении В.

Результаты расчета показывают, что значения коэффициентов полинома для описания функциональной зависимости диэлектрической проницаемости бензина (на примере АИ-92) от температуры будут иметь вид:

$$K_{T\epsilon} = 2,108 \pm 5,2 \cdot 10^{-4} - (0,794 \pm 0,18) \cdot 10^{-4} T \quad (3.13)$$

Аналогичным образом получим зависимости для бензина АИ-95 и АИ-98 соответственно:

$$K_{T_{\varepsilon}} = 2,19 \pm 4,8 \cdot 10^{-4} - (0,724 \pm 0,16) \cdot 10^{-4} T \quad (3.14)$$

$$K_{T_{\varepsilon}} = 2,28 \pm 4,9 \cdot 10^{-4} - (0,50 \pm 0,15) \cdot 10^{-4} T \quad (3.15)$$

Графики зависимости диэлектрической проницаемости от температуры вычисленные аналитическим способом по выражениям 3.13 – 3.15 представлены на рисунке 3.2. Также на рисунке 3.2 представлена реальная характеристика полученная путем проведения экспериментов.

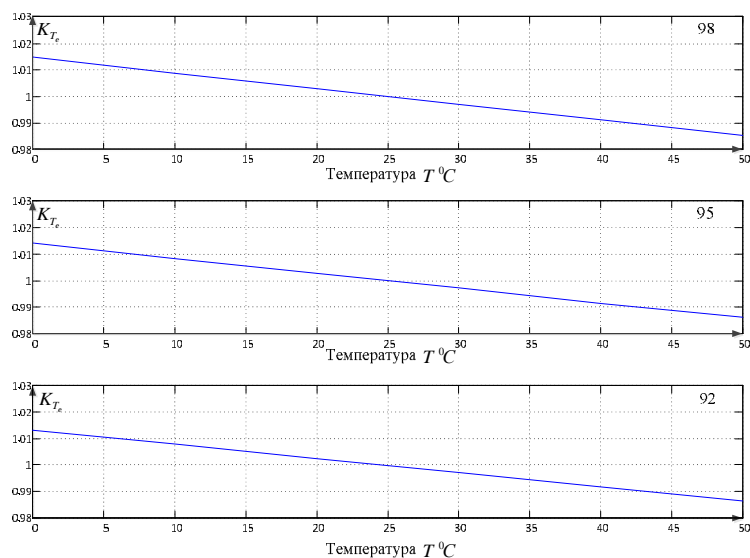


Рисунок 3.2 – Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры для бензина АИ-92, АИ-95, АИ-98.

Для оценки погрешности метода аппроксимации вычислим суммы квадратов отклонений исходных данных от значения функции в конкретной точке [79]. Для этого необходимо решить уравнение вида:

$$s_{\text{апр}} = \sum_{i=0}^n (e_i - (at_i + b))^2 \quad (3.16)$$

Подставляя значения в выражение (3.16) получим $s_{\text{апр}}(\text{АА} - 92) \approx 0,00438$ ед, $s_{\text{апр}}(\text{АА}-95) \approx 0,00610$ ед, $s_{\text{апр}}(\text{АА}-98) \approx 0,008702$ ед. Таким образом, максимальная погрешность при использовании функции температурной коррекции составляет 0,8 %.

Следовательно, применение метода наименьших квадратов наиболее оптимально для получения калибровочной характеристики по температуре для прибора диэлкометрического контроля. В этом случае для получения температурной

зависимости диэлектрической проницаемости, достаточно получить значения коэффициентов полинома исследуемой функции в процессе калибровки прибора.

3.3 Определение диэлектрической проницаемости бензина с коррекцией от удельной проводимости топлива

В настоящий момент вывод аналитического выражения зависимости диэлектрической проницаемости от удельной проводимости топлива является сложной математической задачей из-за нелинейности характеристики. Следовательно, заявленную возможность коррекции октанового числа с учетом удельной проводимости топлива целесообразно решить путем обработки статистических данных экспериментов. Так как количество присадок и примесей оговаривается не строгим образом (глава 1), предлагается использовать метод корректировки топлива по заранее откалиброванным моделям эталонного топлива для конкретного нефтеперерабатывающего завода. Более подробно использование калибровочной характеристики рассматривается в разделе 3.3 настоящей главы. Для построения калибровочной характеристики измерителя необходимо провести анализ предоставленных статистических рядов и путем интерполяции вывести промежуточные значения между точками эксперимента. Для получения зависимости октанового числа от удельной проводимости измеряемого топлива и как следствие изменения $\epsilon_x(f)$, проведено имитационное моделирование двух узлов функциональной схемы – ИП1 и ГУ1 в *MULTISIM* [73]. Имитационная модель ИП 1 представлена на рисунке 3.3.

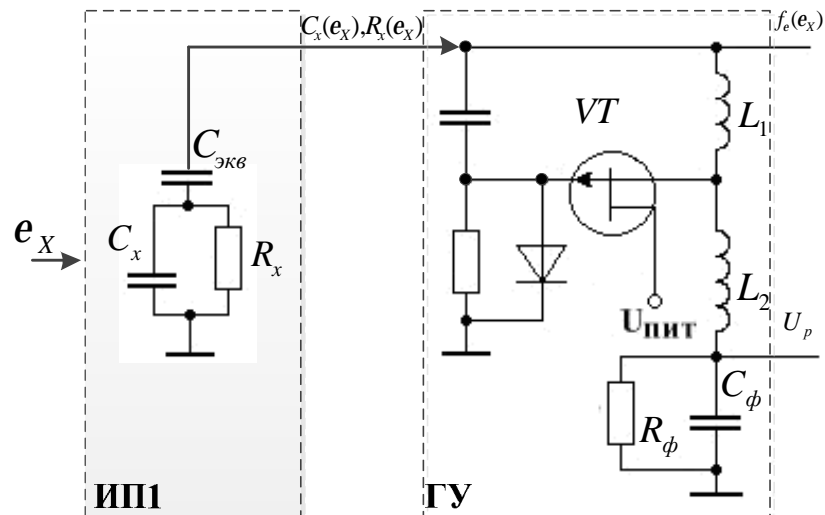


Рисунок 3.3 – Моделируемая схема измерительного генератора.

В соответствии с математической моделью, описанной в главе 2, рекомендуется отбраковывать топливо по удельной проводимости и соответственно вводить компенсацию в измерения при значениях удельной проводимости 0-100 нСим/м. Однако в идеале для качественного бензина активная проводимость не должна превышать 10 нСим/м, максимальная величина 100 нСим/м допускается но качественным его уже не назовешь. В соответствии с поставленной задачей по отбраковке топлива по удельной проводимости, проведено моделирование работы узлов представленных на рисунке 3.3, с целью получения экспериментальной зависимости диэлектрической проницаемости топлива от его удельной проводимости, и как следствие зависимости октанового числа от удельной проводимости измеряемой среды. Моделирование значения удельной проводимости среды производилось изменение параметров резистора R_x , являющегося эквивалентным удельной проводимости измеряемой среды. Сопротивление резистора изменялась в пределах 1-20 МОм, что соответствует изменению эквивалентной проводимости от 0-200 нСим/м. С целью формирования массива корректирующих коэффициентов по удельной проводимости топлива по результатам моделирования, получен график экспериментальной зависимости (рис. 3.4). На основании полученных статистических данных зависимость напряжения контура, являющегося функцией диэлектрической проницаемости топлива от активной удельной прово-

димости. С учетом ее нелинейности с помощью обобщенного метода наименьших квадратов было получено выражение для определения корректирующих коэффициентов.

$$K_{T_s} = 0,0078931 s^2 + 0,036856 s + 0,32573 \quad (3.17)$$

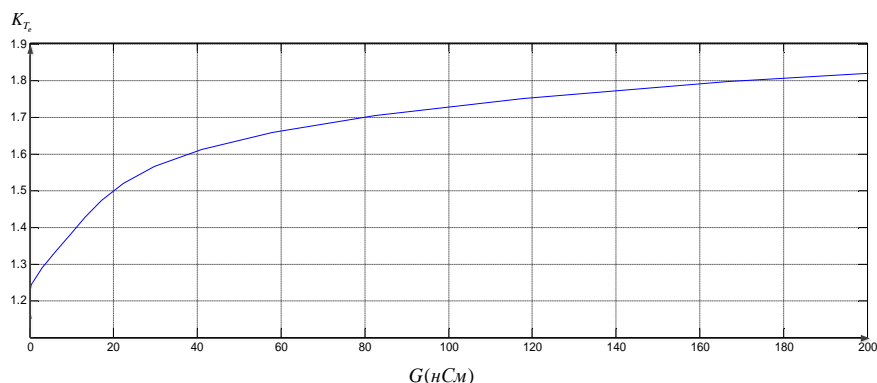


Рисунок 3.4 – Значение поправки по удельной проводимости

Конечное значение октанового числа определяется с помощью полиномиального многочлена пятого порядка Лагранжа [87] (3.19), полученного путем интерполяции массива данных зависимости октанового числа (D) от значения диэлектрической проницаемости (e).

$$e'_{бенз} = e_{бенз} K_{TC} K_{T_s} g e_0, \quad (3.18)$$

$$D(e) = 16,501 \cdot 10^4 e'_{бенз}{}^5 - 180,302 \cdot 10^4 \cdot e'_{бенз}{}^4 + 787,850 \cdot 10^4 \cdot e'_{бенз}{}^3 - 1720,66 \cdot 10^4 \cdot e'_{бенз}{}^2 + 1878,3 \cdot 10^4 \cdot e'_{бенз} - 819,918 \cdot 10^4 \quad (3.19)$$

В результате экспериментальной проверки работы алгоритма были получены графики зависимости октанового числа топлива от его температуры и значения удельной проводимости (рис. 3.5).

Анализ результатов эксперимента показывает, что при учете температуры топлива и его активной удельной проводимости погрешность определения его октанового числа снижается до значения 1,0 %.

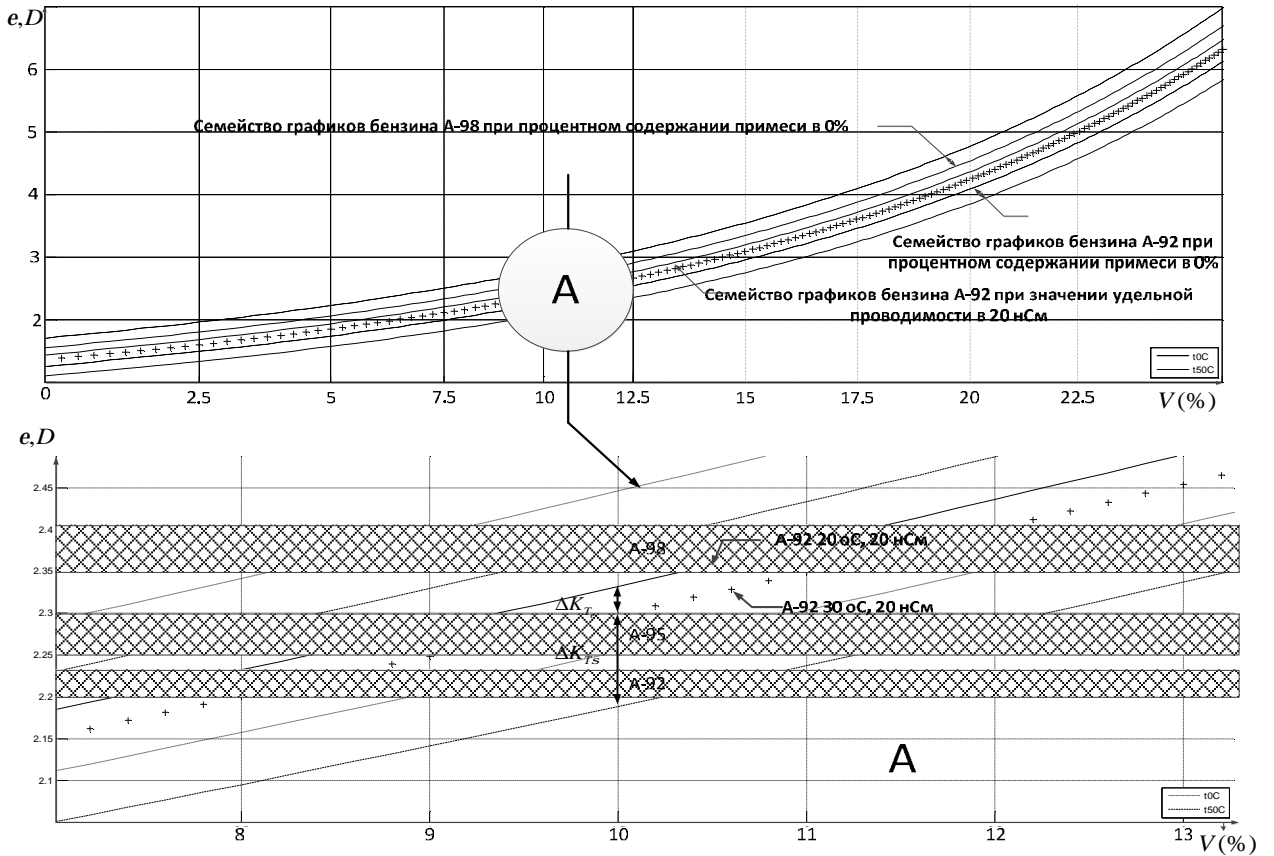


Рисунок 3.4 – Графики зависимости октанового числа топлива от температуры и удельной проводимости

Зависимость октанового числа от диэлектрической проницаемости описана в главе 2. Для получения результирующего значения октанового числа необходимо разработать многомерный массив данных и из него уже вывести корректирующие коэффициенты. Таким образом, снижается нагрузка на микропроцессорное устройство за счет снижения количества вычислений в процессе измерения.

3.4. Алгоритм экспрессного контроля бензина

Исходя из разработанной функциональной схемы системы (рис. 3.1) алгоритм контроля качества бензина должна включать в себя следующие этапы.

1. Перед проведением измерения прибор должен быть откалиброван на эталонном бензине.

Электрофизические методы контроля в связи с ограниченностью измеряемых параметров позволяют оценивать параметры только бензина с предварительно заявленным октановым числом. При этом в памяти вычислительного устройства сохраняются калибровочные модели, отражающие индивидуальные особенности каждого вида топлива. Процесс калибровки представляет собой вычисление коэффициентов аппроксимирующих полиномов (3.7, 3.19) и набор статистики для измерения. Под статистикой понимаются значения параметров диэлектрической проницаемости, удельной проводимости и температуры характеризующих конкретный вид топлива.

2. Ввод заявленного топлива

Осуществляется путем выбора калибровочной характеристики в блоке обработки данных. В памяти блока обработки данных хранятся калибровочные характеристики для трех видов бензина (АИ-92, АИ-95, АИ-98), перед проведением измерения пользователь самостоятельно указывает прибору по какой характеристике производить оценку измеряемого топлива. Данный метод существенно ограничивает использование прибора в измерении топлива полученного на разных нефтеперерабатывающих заводах, однако при этом существенно повышает точность измерения при наличии эталонного топлива. По этим причинам невозможно получить универсальную калибровочную характеристику.

3. Приведение прибора в исходное положение

Перед началом цикла контроля, при отсутствии в емкостном датчике топлива, устанавливаются резонансную частоту $f_e(e_x)$ контура на 10 % ниже начальной частоты колебаний опорного генератора ОГ. Этим обеспечиваются высокая чувствительность прибора и линейность его характеристики при контроле парамет-

ров топлива. Расчет выигрыша от повышения разрешающей способности приведен в выражении 3.7

4. Определение значения $f_e(e_x)$, U_p , $f_T(T_x)$

Вычисление значений $f_e(e_x)$ и $f_T(T_x)$ путем фиксирования количества импульсов на заданном интервале $t_{изм}$. Значение U_p вычисляется путем преобразования значения напряжения в цифровой код с помощью АЦП. Полученные значения количества импульсов за фиксированный интервал N оцениваются блоком обработки данных, таким же образом происходит оценка значения U_p .

5. Проверка условий осуществления измерений – значения $f_T(T_x)$ и U_p

В случае если измеряемое топливо не соответствует заявленным значениям необходимыми для измерения (температура не ниже 0 градусов и удельная проводимость не больше 100 нСим/м – глава 2) алгоритм не может быть применен. О невозможности применения методики выводится сообщение на дисплей прибора.

6. Внесение поправок

Внесение поправок на температуру осуществляется в соответствии с выражениями 3.16 – 3.18. То есть измеренная температура подставляется в одно из указанных выражений для необходимого вида топлива и по формуле рассчитывается поправка, которую необходимо внести к полученному результату. Поправка по удельной проводимости осуществляется путем оценки значения U_p характеризующее значение удельной проводимости измеряемого топлива, корректировка производится по зависимости, полученной на рисунке 3.4. Все вычисления производятся в блоке обработки данных.

7. Вычисление значения ОЧ

Осуществляется по выражению 3.5. При этом получается косвенное значение октанового числа полученного в количестве импульсов за фиксированный интервал, методом интерполяции с использованием значения $f_{e.реал}(e_x)$. После этого

по таблицам, полученным в главе 2, получается значение октанового числа в единицах.

8. Вывод информации

Осуществляется путем вывода значения октанового числа в единицах, и вывода сообщения об ошибках в случае несоответствия заявленным параметрам.

Алгоритм измерения в виде блок-схемы приведена на рисунке 3.5

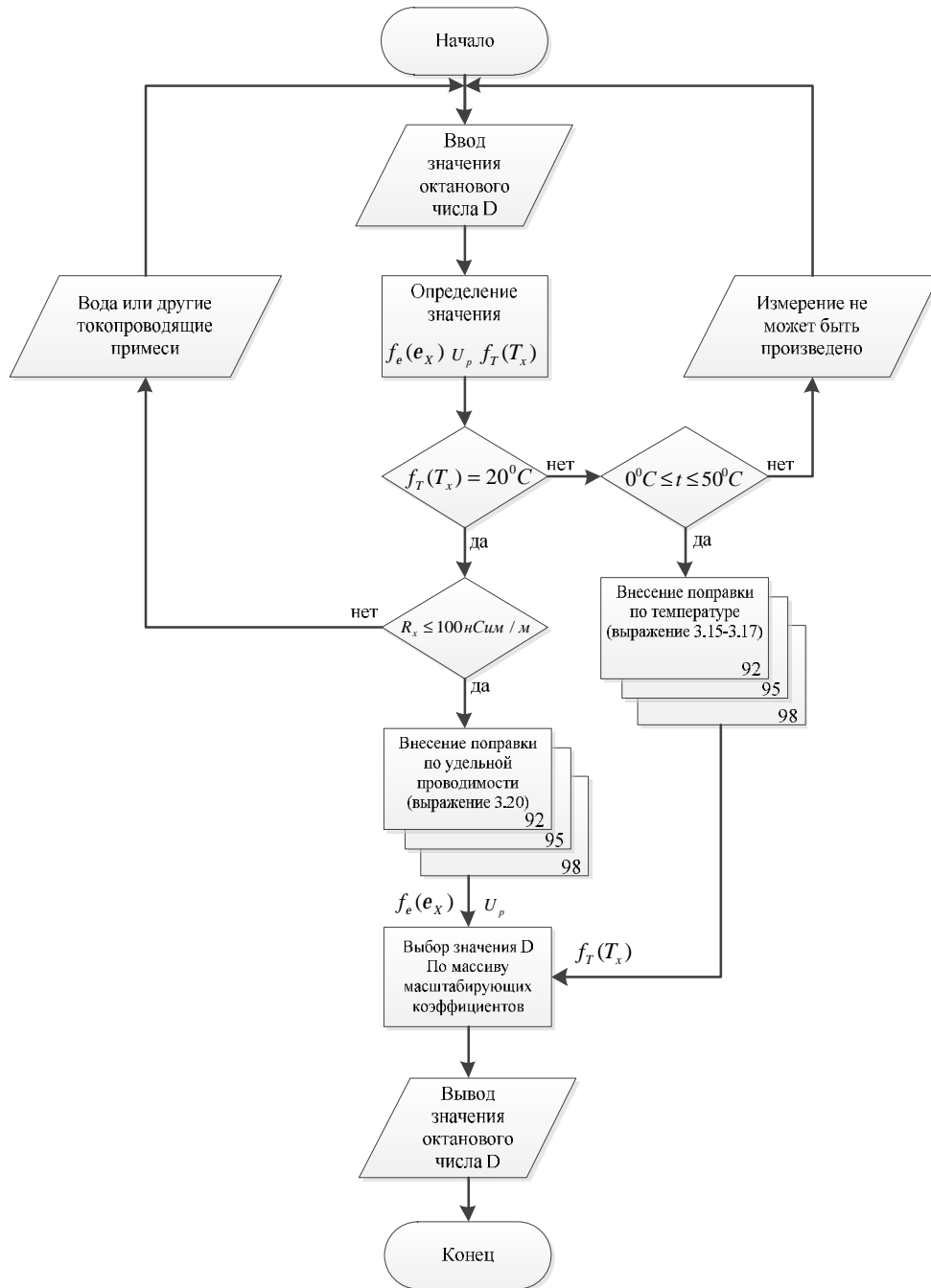


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма экспресс-контроля качества топлива.

Выводы по третьей главе

1. Разработана функциональная схема прибора экспрессного контроля бензина, описаны назначения блоков и узлов функциональной схемы, предложен способ расширения диапазона контроля и повышения чувствительности к контролируемым параметрам.

2. Проведено исследование влияния температуры топлива на его диэлектрическую проницаемость, в ходе которого получены массивы статистических данных. С использованием нелинейного регрессионного анализа, произведен расчет коэффициентов полинома, необходимых для формирования массива корректирующих коэффициентов.

3. Исследовано влияние проводимости среды на диэлектрическую проницаемость бензина, в ходе которого получено аналитическое выражение для описания зависимости введённого коэффициента поправки по диэлектрической проницаемости от значения удельной проводимости.

4. Исследованы статистические зависимости октанового числа от значения диэлектрической проницаемости, в результате анализ которых позволил сформулировать условие для выбора аппроксимирующего полинома с точностью аппроксимации 0,01%. Для описания аналитической зависимости достаточно использовать полином пятого порядка.

5. Проведена экспериментальная проверка работы алгоритма, в результате которого установлено, что при концентрации воды объемом в 10% для бензина марки АИ-92 за счет ведения поправки по температуре и удельной проводимости погрешность определения октанового числа снижается до значения 1%.

6. С целью проверки предложенного алгоритма необходимо выполнить его исследование его корректности, устойчивости и вычислительной сложности.

ГЛАВА 4 – РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНА

4.1 Выбор оптимального типа электростатического преобразователя для экспрессного контроля бензина

Одной из проблем, возникающих при контроле качества бензина диэлькометрическим способом является оптимальный выбор измерительного преобразователя [92]. В общем случае измерительное преобразование представляет собой выражение размера одной физической величины размером другой физической величины связанной с ней функционально. Измерительное преобразование в этом случае является единственно возможным способом построения измерительных устройств. В связи с этим к конкретному измерительному преобразователю применяется ряд требований, выполнение которых позволяет произвести измерение измеряемой величины с минимальной погрешностью [86,89].

С точки зрения экспрессного измерения бензин, как среда, характеризуется величиной диэлектрической проницаемости и электрической проводимости. Известно, что диэлектрическая проницаемость бензина зависит от частоты измерения, и с ее увеличением она сложным способом уменьшается. Изменение диэлектрической проницаемости от частоты является следствием наличия в бензине электрически ассиметричных сравнительно больших инерционных ассоциаций, с повышением частоты поля они не успевают смешаться, что является причиной уменьшения диэлектрической проницаемости [98].

С учетом указанных выше характеристик измеряемой среды можно сформулировать минимальные требования к измерительному преобразователю:

1. Минимальная зависимость емкости от внешних условий.
2. Независимость измеряемой величины от объема измеряемой среды.
3. Минимальное влияние преобразователя на измеряемую среду.

Рассмотрим основные подходы к построению измерительных преобразователей.

Классический измерительный преобразователь, работающий на основе емкостного метода, представляет собой плоский конденсатор измеряемая среда, в котором помещается между его пластинами (рисунок 4.1).

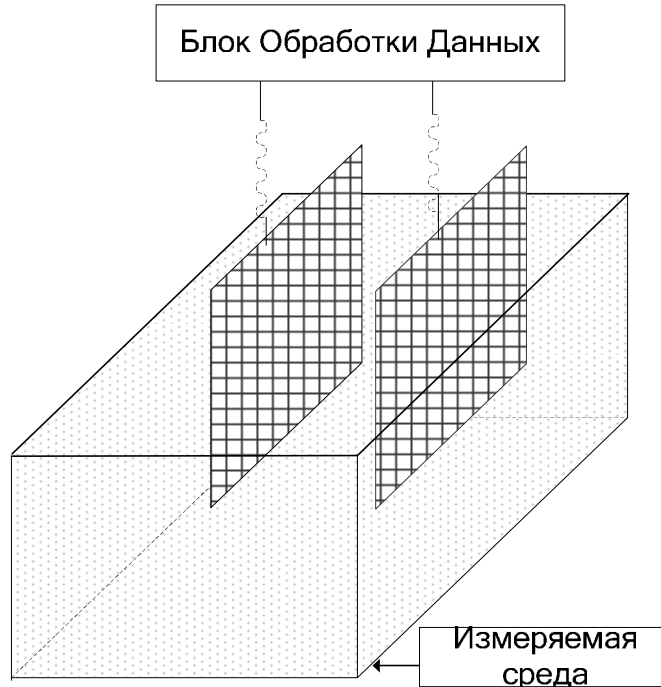


Рисунок 4.1 – Классический емкостный преобразователь

Для данного вида преобразователя существуют определенные существенные недостатки. Основной недостаток заключается в том, что электрическое поле, существующее между обкладками конденсатора, искривляется на краях конденсатора (краевой эффект) и при конечных размерах пластин конденсатора вносит погрешность в результат измерения. Вторым существенным недостатком является отсутствие защиты от воздействия наводок. Для измерения бензина этот недостаток очень существенный – так как накопленный заряд может влиять на результат измерения.

Наиболее приемлемым емкостным преобразователем для контроля бензина, следует считать преобразователь, построенный по принципу цилиндрического конденсатора (рисунок 4.2).

Основными преимуществами такого преобразователя является большое соотношение радиуса внешнего цилиндра к внутреннему, что позволяет пренебре-

гать краевыми эффектами и получить максимально экранированный объем измерения [114,115].

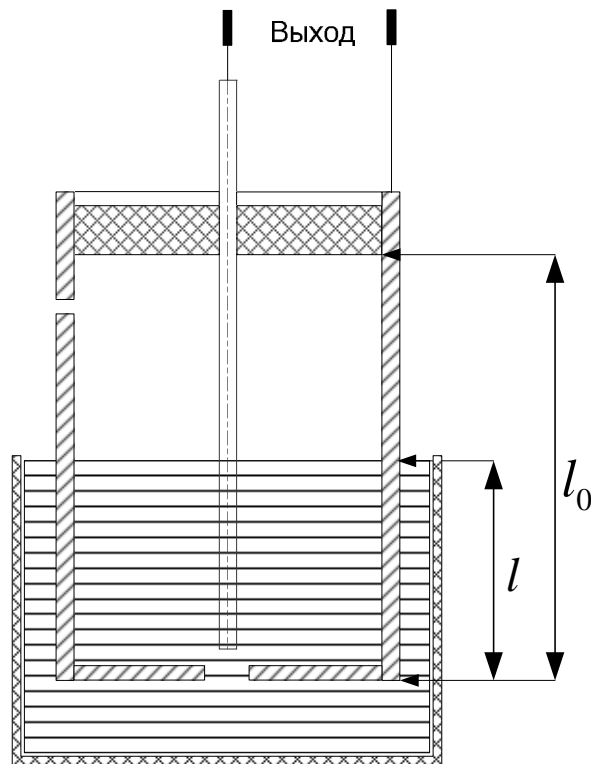


Рисунок 4.2 – Схематическое представление цилиндрического преобразователя

Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор C_1 – образованный частью электродов и диэлектриком (жидкостью) (размеры конденсатора определяются величиной l), конденсатор C_0 – оставшаяся часть электродов и диэлектриком (воздухом) (размеры данного конденсатора определяются величиной $l - l_0$). Емкость такого преобразователя рассчитывается следующим образом:

$$C = C_0 + C_1 = [l \cdot e + (l_0 - l)e_0] \frac{2p}{\ln(R_2/R_1)} \quad (4.1)$$

где l_0 – полная длина цилиндра, l – длина на которую цилиндр заполнен жидкостью, e – диэлектрическая проницаемость жидкости, $e_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ пФ/м, R_2 и R_1 – соответственно радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Анализ данного выражения показывает, что точность измерения емкости данным преобразователем зависит от высоты наполнения измерителя жидкостью (l). Для устранения данного недостатка при проектировании преобразователя необходимо выполнить следующее условие $l = l_0 = const$. В этом случае выражение для определения емкости конденсатора можно записать следующим образом:

$$C = \frac{2plee_0}{\ln(R_2/R_1)} \quad (4.2)$$

где $\frac{2pl}{\ln(R_2/R_1)}$ – является константой и определяется геометрическими размерами датчика.

Из этого следует, что информацию об измеряемом параметре несет емкость датчика, заполненного контролируемым материалом, которая связана с его диэлектрической проницаемостью ϵ линейным выражением [97].

$$C_x = g\epsilon\epsilon_0 \quad (4.3)$$

где g – геометрический фактор, учитывающий конфигурацию и размеры электродов датчика; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Следует отметить, что выражение (4.3) справедливо только для контролируемой среды или материалов без активных электрических потерь. В реальных средах с активными потерями диэлектрическая проницаемость материала представляет собой комплексную величину, содержащую мнимую и реактивную составляющие. Соответственно реальная емкость измерительного преобразователя будет являться величиной из двух составляющих

$$C_{\text{реал}} = C_x \pm \Delta C \quad (4.4)$$

где $C_{\text{реал}}$ – реальная емкость измерительного преобразователя, C_x – емкость идеального измерительного преобразователя, ΔC – абсолютная погрешность для измеряемой среды, обусловленная наличием дополнительных примесей.

Окончательной выражения для определения емкости измерительного преобразователя имеет следующий вид:

$$C_{\text{реал}} = g e_0 (e + e_{\text{прим}}) \quad (4.5)$$

где $e_{\text{прим}}$ – диэлектрическая проницаемость примесей в топливе.

Таким образом, для преобразователя, построенного на основе цилиндрического конденсатора характерны следующие преимущества:

- 1) максимально экранированный объем внешней обкладкой конденсатора (существенно снижает воздействие наводок);
- 2) значительно меньшее влияние на результат измерения паразитных емкостей;
- 3) линейная зависимость измеряемой емкости от диэлектрической проводимости среды.

Проведенный анализ типовых электростатических преобразователей показал, что наиболее приемлемым вариантом построения емкостного преобразователя является преобразователь, построенный на основе цилиндрического конденсатора.

4.2 Разработка узлов прибора для контроля октанового числа бензина

Для сравнительной оценки точности измерения октанового числа диэлькометрическим резонансным способом, а также для проведения экспериментальных исследований разработана конструкция емкостного датчика, которая схематично показана на рисунке 4.1.

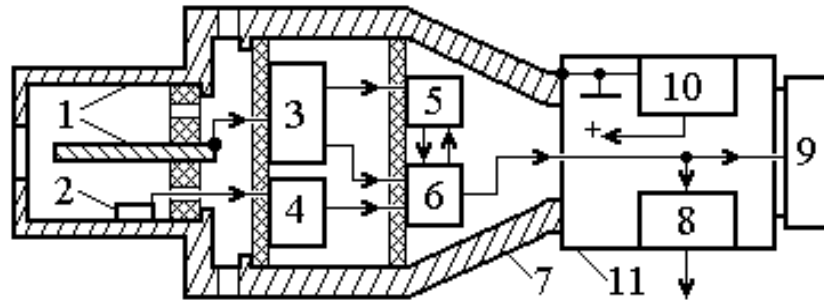


Рисунок 4.3 – Емкостный датчик для измерения октанового числа диэлькометрическим резонансным способом.

В состав устройства в соответствии с принципами конструирования РЭА[103] входит емкостной датчик 1 цилиндрической формы, один из электродов которого выполнен в виде короткого стержня, расположенного внутри цилиндра с загнутыми внутрь краями. На одной из внутренних стенок этого цилиндра закреплен малогабаритный полупроводниковый датчик температуры 2. Внутренний электрод емкостного датчика 1 подключен к резонансному контуру первого генератора 3, а выход датчика температуры 2 соединен с входом второго генератора 4. Первый выход генератора 3 через аналого-цифровой преобразователь 5 подключен к одному из входов блока обработки данных 6, два других входа которого соединены соответственно с выходами генераторов 3 и 4. Основные функциональные узлы размещены в корпусе 7 устройства. К выходу блока обработки данных 6 подключены блок сопряжения 8 с персональным компьютером и цифровой индикатор 9. Для получения напряжения питания функциональных блоков устройства применен автономный блок питания 10, расположенный в рукоятке 11 устройства, а общая клемма блока питания подключена к корпусу устройства.

Для проверки адекватности теоретических положений, приведенных в третьей главе, проведена разработка принципиальной схемы генератора и экспериментальные исследования диэлектрического измерителя октанового числа с учетом проводимости и температуры измеряемого топлива. При разработке этого прибора с автономным питанием кроме требований к точности и линейности характеристики преобразования учитывались дополнительные требования, применяемые к переносной аппаратуре[95]:

- для уменьшения количества необходимых гальванических элементов прибор должен работать при низком напряжении питания $U_{\text{пит}} \approx (3 \dots 4,5) \text{ В}$;
- для увеличения времени непрерывной работы прибора без замены гальванических элементов его ток потребления должен быть минимальным;
- результаты цифровых измерений частоты и амплитуды выходного сигнала емкостного датчика должны запоминаться в блоке памяти и выводиться на индикаторное табло непосредственно в значениях октанового числа;
- наличие интерфейса и порта *USB* для связи с внешней ПЭВМ, обеспечивающих возможность перепрограммирования постоянного запоминающего устройства, в частности, для табличного задания характеристик преобразования в зависимости от вида или структуры контролируемого материала;
- возможность калибровки для периодической проверки правильности функционирования прибора;
- автоматический контроль напряжения автономного питания с визуальной индикацией разряда гальванических элементов;
- минимальные масса и габаритные размеры прибора.

В результате предварительных экспериментальных исследований, проведенных после натурных испытаний различных схем *LC*-генераторов, собранных на операционных усилителях, КМОП логических элементах и транзисторах разработана схема генератора на полевом транзисторе с индуктивной трехточкой, содержащей емкостной датчик (рисунок 4.2). При сравнительной простоте реали-

зации в этом датчике обеспечивается выполнение сразу нескольких требований, предъявляемых к автономным приборам:

1) амплитуда выходного сигнала ограничивается на максимальном уровне $U_M \leq 2$ В за счет включения кремниевого диода VD в цепи затвора полевого транзистора, что позволяет автоматически согласовать уровни выходного сигнала датчика с цифровой частью прибора;

2) применение к цепи истока полевого транзистора дополнительного резистора R_2 , зашунтированного фильтрующим конденсатором C_ϕ позволяет, во-первых, ограничить постоянный ток потребления генератора на микроамперном уровне, во-вторых, повысить температурную стабильность частоты выходных колебаний генератора при изменении напряжения питания и температуры эксплуатации датчика и, в третьих, без применения дополнительного амплитудного детектора сформировать регулирующее напряжение U_p , прямо пропорциональное проводимости G_X контролируемого материала.

В данной схеме (рис. 3.6) можно сразу получать два параметра, характеризующих диэлектрическую проницаемость и электрическую проводимость контролируемого материала – по частоте колебаний f_p судить о диэлектрической проницаемости ϵ , а по напряжению U_p – о проводимости материала, и использовать этот второй параметр для коррекции результатов контроля октанового числа.

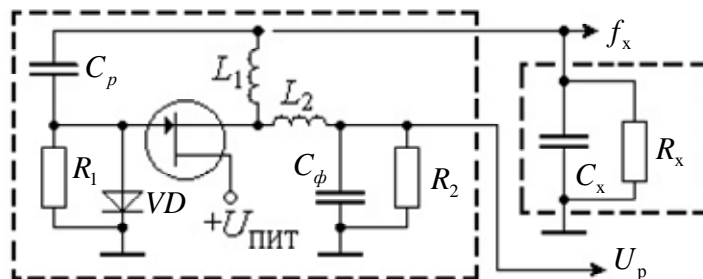


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема генераторного датчика.

Особенностью разработанной схемы является нелинейный режим работы полевого транзистора VT (рис. 4.4), который работает в глубоком C -режиме. В

каждом периоде колебаний транзистор открывается только на короткое время, а формирование гармонической формы выходного сигнала обеспечивается за счет избирательных свойств LC -контура. Вследствие этого обеспечивается высокая добротность контура и, как следствие, высокая стабильность частоты выходных колебаний (при постоянных значениях LC -параметров). В схеме генератора обеспечивается практически линейная зависимость постоянного тока питания полевого транзистора от проводимости контролируемого материала $I_{\text{пит}} = K_I \cdot G_X$ и, соответственно, нелинейная зависимость падения напряжения U_P на образцовом резисторе R_2 от сопротивления R_X материала. Это напряжение кодируется с помощью АЦП, входящего в состав микропроцессорной цифровой части измерителя, и используется для последующей коррекции результатов измерения октанового числа бензина в зависимости от его электрической проводимости.

Радикальным способом, позволяющим уменьшить влияние проводимости бензина на результат измерения октанового числа, является нанесение диэлектрического покрытия на электроды емкостного датчика. Такой технологический прием позволяет повысить относительную чувствительность емкостного датчика к измеряемому параметру.

Следует отметить, что включение дополнительного конденсатора $C_{\text{и}}$ последовательно с емкостью C_X датчика приводит к снижению резонансной чувствительности относительно максимального значения, составляющего $S_{P_{\text{max}}} = (\Delta f_P / f_P) / (\Delta C_X / C_X) \approx 0,5$. Такая чувствительность достигается в резонансном LC -контуре, содержащем только одну емкость датчика C_X .

При включении конденсатора $C_{\text{и}}$ последовательно с емкостью C_X резонансная чувствительность датчика определяется выражением

$$S_P \approx C_{\text{и}} \cdot (\Delta f_P / f_P) / [(\Delta C_X / C_X) \cdot (C_{\text{и}} + C_X)],$$

согласно которому подключение конденсатора $C_{\text{и}} = C_X$ приводит примерно к двукратному уменьшению чувствительности емкостного датчика и соответствующему уменьшению девиации его резонансной частоты.

Графические зависимости чувствительности S_p резонансного датчика и приращения частоты Δf_p от относительного изменения его емкости ΔC_x при наличии и без подключения конденсатора $C_{и}$ приведены на рисунке 4.10, а.

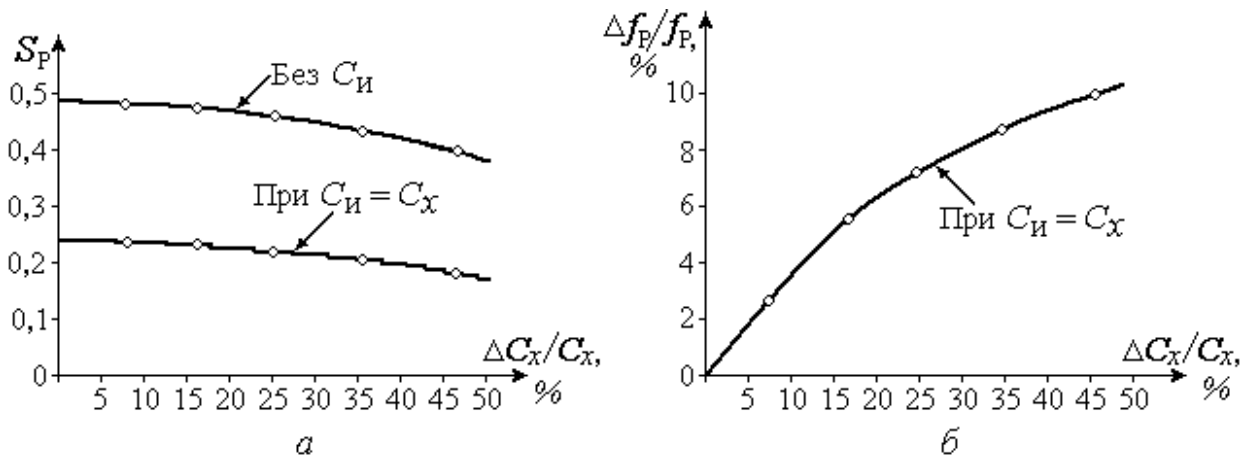


Рисунок 4.5 – Зависимости чувствительности (а) и относительного изменения частоты колебаний от приращения емкости датчика (б)

При экспериментальных исследованиях характеристик и чувствительности емкостного генераторного датчика в его электродах подключались конденсаторы и резисторы с известными номиналами, а также параллельные резистивно-емкостные цепи, параметры которых предварительно измерялись высокоточным цифровым прибором *INSTEK LCR-816*. Выходные параметры датчика контролировались по показаниям цифрового частотомера и цифрового мультиметра, причем показания приборов снимались не менее 10 раз в каждой точке. После этого вычислялись средние значения и дисперсия полученных результатов (резонансной частоты и f_p и напряжения U_p), по которым были построены зависимости, приведенные на рисунке 4.5.

Принцип работы генератора заключается в следующем - на двух выходах схемы генератора (рис. 4.4) формируются два параметра, характеризующих октановое число и электрическую проводимость контролируемого бензина – по частоте колебаний f_x судят о диэлектрической проницаемости и октановом числе, а по напряжению U_p – о проводимости бензина, которая повышается при увеличении процентного содержания электропроводящих примесей. Это позволяет использо-

вать второй параметр (напряжение U_p) для коррекции результатов измерений октанового числа бензинов.

Если не учитывать электрическую проводимость бензина, то частота выходных колебаний $f_x = 1/2p\sqrt{(L_1 + L_2)C_x}$ генератора зависит от емкости C_x емкостного датчика и индуктивностей L_1 и L_2 резонансного контура [90,91]. Однако наличие электрической проводимости бензина приводит к уменьшению активного эквивалентного сопротивления R_x между обкладками емкостного датчика, вследствие чего реальная частота колебаний генератора уменьшается:

$$f_{x.РЕАЛ} = f_x \sqrt{1 - (L_1 + L_2)/4R_2^2 C_x}.$$

При уменьшении активного сопротивления бензина R_x увеличивается ток питания полевого транзистора VT и повышается падение напряжения U_p на резистивно-емкостном фильтре, которое с учетом напряжения отсечки $U_{отс}$ полевого транзистора определяется выражением $U_p = U_{отс} R_2 / (R_2 + R_x)$.

Вследствие этого в блоке обработки данных можно вычислить скорректированное значение частоты выходных колебаний генератора по формуле:

$$f_x = f_{x.РЕАЛ} / \sqrt{1 - \frac{(L_1 + L_2) \cdot U_p^2}{4R_2^2 C_x (U_{отс} - U_p)^2}}. \quad (4.6)$$

Запись этой функции в память микропроцессора блока обработки данных позволяет по известному значению напряжения отсечки $U_{отс}$ и полученному на выходе аналого-цифрового преобразователя значению напряжения U_p вычислять микропроцессором истинную частоту f_x генератора и по калибровочной таблице определять октановое число.

4.3 Оценка корректности, устойчивости и сложности алгоритма экспресс контроля бензина

Для оценки сложности предложенного алгоритма определим, как зависит время счета от размера данных. При этом необходимо оценить разрядность входного кода, определяемого функцией вида $n = f(f_e(e_x), U_p, f_T(T_x))$, и рассчитать порядок искомой функции, который и даст основание отнести данный алгоритм уравнивания к соответствующему классу [138].

Согласно методике, описанной в [139], искомую функцию можно определить следующим образом:

$$\sum n_i = (n_9 + n_{10} + n_{15} + n_{16})n_{21} + c \quad (4.7)$$

Где

$$n_9 = j(f_e(e_x)), n_{10} = j(U_p), n_{15} = j(T_x), n_{16} = j(e_x), n_{21} = j(f_T(T_x)),$$

$$c = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8 + n_{11} + n_{12} + n_{13} + n_{14} + n_{17} + n_{18} + n_{19} + n_{20} + n_{22} = const$$

скобки, окончательно можно получить:

$$\sum n_i = j(f_e(e_x)) + j(U_p) + j(T_x) + j(e_x) + j(f_T(T_x)) + C \quad (4.8)$$

Анализ выражения (4.8) позволяет сделать вывод: алгоритм экспресс-контроля топлива является основанием степени.

Следовательно, в оценке $n = O(f_e(e_x), U_p, f_T(T_x))$ алгоритм является легким. На основании полученной оценки сложности можно сделать вывод, что время работы разработанного алгоритма конечно и сравнительно невелико.

Обеспечение корректности алгоритма экспресс контроля бензина, осуществляется путем проверки входных данных на корректность в блоках оценки входных данных алгоритма, жесткие условия контроля входных данных позволяют сделать вывод о невозможности использования алгоритма на заведомо некорректных значениях входных данных. Следовательно, на основании этого можно считать, что алгоритм корректен и устойчив.

4.4 Особенности калибровки прибора контроля бензина

Реальная точность прибора контроля качества бензина зависит от точности получения калибровочных характеристик при калибровке приборов на эталонном топливе. Так как прибор относится к приборам, использующим экспрессный метод контроля, повышение эффективности измерения достигается путем увеличения числа измеряемых параметров по сравнению с существующими аналогами. Недостатком прибора работающего путем сравнения измеряемого образца с эталонной характеристикой, является невозможность построения универсальной эталонной характеристикой. Однако в пределах эталона подобный способ повышает чувствительность прибора к контролируемым параметрам и сокращает время измерения.

Все приборы контроля качества октанового числа бензина калибруются эмпирическим путем. Эмпирическая градуировка [105,110] должна решать две проблемы:

- определение градуировочной зависимости, удовлетворяющей требованию наиболее точного удовлетворения статистическим данным;
- оценка основной погрешности градуируемого прибора.

При построении калибровочной характеристики по экспериментальным данным возможен следующий подход:

1. Если рассматривать эту характеристику как зависимость случайно зависимой переменной y от неслучайной независимой переменной x , можно для получения калибровочной характеристики применить регрессионный анализ данных. Данный метод применяется если погрешностью образцового метода можно пренебречь.
2. Если погрешностью образцового метода нельзя пренебречь или если ее значение неизвестно, следует рассматривать переменные x и y , как случайные величины между которыми существует не регрессионная а корреляционная связь.

В этом случае для оценки погрешности прибора можно использовать дисперсию и доверительные интервалы калибровочной характеристики при заданной

доверительной вероятности [104,113]. Так как калибровка прибора в конечном итоге сводится к определению коэффициентов функций полученных путем аппроксимации методом наименьших квадратов, проведем анализ зависимости доверительной вероятности от количества точек калибровки.

Величины y_i нормально распределены вокруг $ax_i + b$ (раздел 3.2 главы 3) с дисперсией S^2 . В статистике обосновывается, что величина S/S^2 , составленная из суммы квадратов независимых нормально распределенных величин, подчиняется распределению c^2 , плотность вероятности которого определяется выражением [108]:

$$P_m(c^2) = \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \cdot \Gamma(m/2)} \cdot e^{-\frac{c^2}{2}} \cdot (c^2)^{\frac{m-2}{2}} \quad (4.9)$$

где $0 < c^2 < \infty$, а $m = n - 3$ (n – количество парных измерений). Вид распределения для формулы 3.16 показан на рисунке 4.6

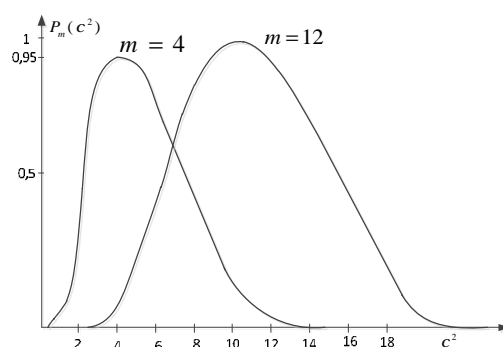


Рисунок 4.6 – Распределение доверительной вероятности в зависимости от количества парных измерений

Таким образом, при заданной доверительной вероятности 0,95 (глава 1) для получения заданной точности в диапазоне c^2 от 2 до 8, что соответствует поставленной задаче в главе 3 достаточно 4 парных измерений при калибровке прибора. Расширение диапазона измерения не требуется, так как значения измеряемого параметра лежат в заведомо ограниченном диапазоне.

4.5 Вычисление суммарной погрешности прибора и оценка эффективности полученного результата.

Реальная точность прибора контроля качества топлива зависит от калибровки прибора, выполняемой непосредственно на исследуемом топливе посредством сравнения полученных данных с результатами измерений полученными лабораторным методом, при этом испытания проводят по моторному и исследовательскому методу [4,5].

Применение в блоке обработки данных измерителя современного микропроцессора позволяет автоматизировать процесс калибровки. В соответствии с пунктом 4.3 для получения результата с доверительной вероятностью 0,95 достаточно проведения 4 измерений по всему диапазону контроля прибора. Практическое применение подобного способа предлагается проводить следующим образом, на панели прибора следует установить кнопку "КЛБ", при нажатии на которую (после погружения датчика в эталонное топливо) микропроцессором автоматически проводятся измерение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости при заданной температуре измерения. Оператор производит подобную операцию в 4 точках по заявленному диапазону температуры, при этом производится вычисление аппроксимирующих коэффициентов полиномов в соответствии с пунктом 3.2 и 3.3. Калибровку прибора для получения заданной точности рекомендуется производить при значениях температуры топлива 2°C , 12°C , 24°C , 50°C . Выбор данных значений температур произведен на основе заявленных требований к среде измерения (глава 1). По полученной зависимости автоматически вычисляются коэффициенты коррекции, умножение которых на результат измерения позволяет получить истинное значение октанового числа с учетом удельной проводимости и температуры измеряемого топлива. Принцип автоматической калибровки по эталонному образцу является оптимальным для приборов допускового контроля. Учитывая известные ограничения точности диэлькометрических измерителей октанового числа, характерные для диэлектрического метода в целом, при разработке приборов целесообразно уделять основное внимание улучшению

эксплуатационных параметров – уменьшению потребляемой мощности и массогабаритных показателей и сокращению времени проведения измерения.

Для оценки общей погрешности измерения необходимо произвести суммирование погрешностей метода [104], измерительных преобразователей, квантования и погрешности адекватности калибровки, получив тем самым общую инструментальную погрешность прибора. Прибор относится к типу приборов с косвенным измерением [107], следовательно погрешность косвенного измерения принято оценивать по методике предложенной в [108]. Так как взаимосвязь косвенной величины измерения и конечного результата может быть самой разнообразной принято оценивать суммарную погрешность по следующему выражению:

$$\frac{\partial Z}{\partial x_i} = \frac{\partial [f(x_1 \dots x_R)]}{\partial x_i} \quad (4.10)$$

Где Z-результат косвенного измерения, x_i - значение прямой измеряемой величины.

Следовательно, сумма погрешностей для некоррелированных величин будет представлять собой уравнение вида:

$$d(Z) = \sqrt{\sum_1^R d_i^2(Z)} = \sqrt{\sum_1^R \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i}\right)^2 \cdot d^2(x_i)} \quad (4.11)$$

Отсюда можно сделать вывод, что для измерений по некоррелированным каналам формула оценки суммарной погрешности примет вид:

$$d_{\text{общ}} \approx \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2} \quad (4.12)$$

Где, d_1, d_2, d_3 , значения погрешностей по каналам измерения. Для разработанного прибора основными погрешностями являются:

- погрешность модели;
- погрешность аппроксимации;
- погрешность дискретизации счета;

Перепишем выражение 4.10 для вычисления суммарной погрешности прибора:

$$d_{\text{общ}} \approx \sqrt{d_{\text{м}}^2 + d_{\text{дс}}^2 + d_{\text{анр}}^2} \quad (4.13)$$

где, $d_{\text{м}}$ – погрешность модели, $d_{\text{дс}}$ – погрешность дискретизации счета, $d_{\text{анр}}$ – погрешность аппроксимации $d_{\text{общ}} \approx 1,0\%$, что соответствует значению абсолютной погрешности $\pm 0,3$ ед.оч.

Погрешность калибровки по эталону оценить в приборах допускового контроля не представляется возможным, так как качества образца заведомо не известно. Прибор позволяет вычислять изменения качества топлива по сравнению с эталоном, следовательно, погрешность калибровки по эталону из общего подсчета необходимо исключить.

Погрешность дискретизации счета связана с ограничением разрядов двоичных чисел при проведении вычислений в микропроцессоре. Учитывая, что в цифровой части устройства применяется микросхема микроконтроллера типа *ATmega 16* фирмы *Atmel* [120,121], выполняющая вычисления в 16-разрядном двоичном коде, то значение данной погрешности будет пренебрежимо мало и составляет при максимальном коде $N_{\text{MAX}} = 2^{15} = 32768$:

$$d_{\text{дс}} \approx 100/N_{\text{MAX}} \leq 0,003\%. \quad (4.14)$$

Таким образом, суммарная погрешность разработанного прибора составляет $d_{\text{общ}} \approx 1,0\%$. Оценку времени измерения предлагается произвести по сумме времени установления выходных колебаний генераторного устройства и времени обработки данных микропроцессорным устройством. Для оценки времени установления выходных колебаний генераторного устройства проведено моделирование, результат которого представлен на рисунке 4.7.

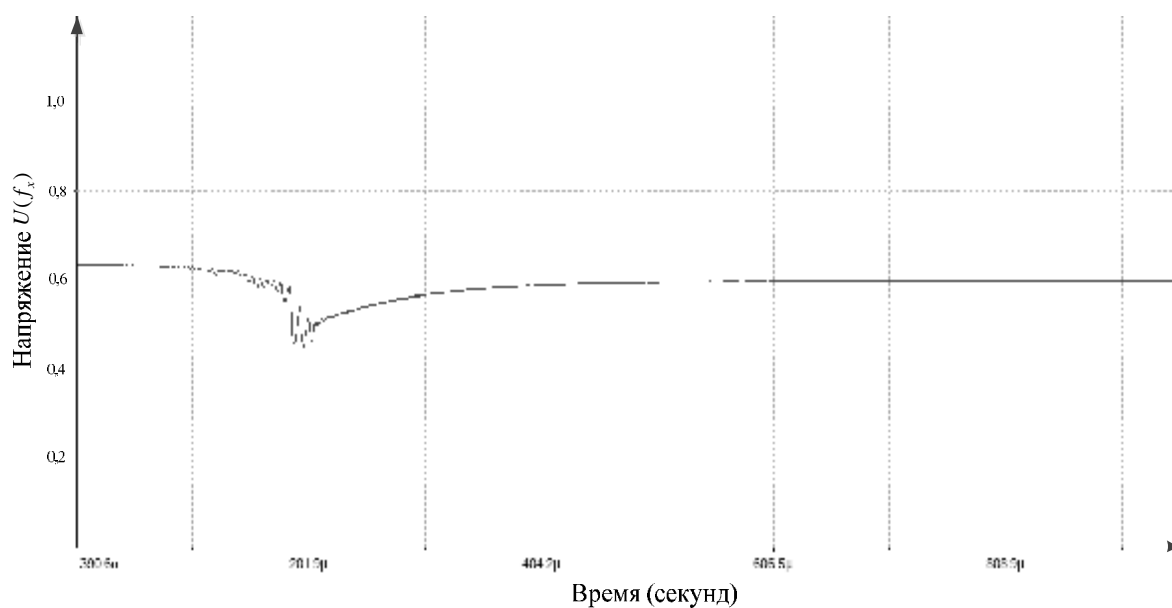


Рисунок 4.7 – График времени установления выходных колебаний для генераторного устройства.

В соответствии с графиком время выхода генераторного устройства в рабочий режим составляет 606,5 микросекунд. Второй составляющей времени измерения, является время обработки данных и произведения математических операций микропроцессорной системой. Экспериментальное исследование данного вопроса показывает, что время затрачиваемое микропроцессором для обработки составляет порядка 2 секунд, следовательно, временем установления выходных колебаний генератора можно пренебречь. Таким образом, по сравнению с исследовательским методом измерения время сокращено и составляет около 2 секунд, чем и достигается выигрыш в эффективности.

Сравнительные характеристики существующих октанометров [124,125,126,130] представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики октанометров

Наименование	Диапазон измерения (ед.оч)	Абсолютная погрешность измерения, ед.оч	Время измерения, с	Коррекция по температуре	Коррекция по удельной проводимости
ПЭ-7300 М (ЭКОХИМ)	66-98	$\pm 1,5$	3	нет	нет
ОКТАН-ИМ	67-98	± 2	10	нет	нет
SHATOX SX-100M	40-120	$\pm 0,5$	5	есть	нет

Таким образом, заявленный образец помимо выполнения требований по погрешности для исследовательского метода измерения, превосходит существующие аналоги.

Для количественной оценки полученного эффекта оценим полученные характеристики методом идеальной точки [101,102].

Определим систему показателей качества измерителя октанового числа, отражающие все ее основные свойства при использовании по основному назначению.

Вектор показателей качества включает две следующие компоненты:

$$\vec{I}(x) = [D, d_{\text{общ}}, t_{\text{изм}}] \quad (4.14)$$

где D – диапазон измерения октанового числа единиц;

$d_{\text{общ}}$ – инструментальная погрешность прибора;

$t_{\text{изм}}$ – время затрачиваемое прибором на измерение.

За базовый образец примем октанометр SHATOX SX-100M.

Произведем нормализацию компонент пространства показателей качества с помощью следующего линейного преобразования:

$$I_n^{(n)}(x; k) = c_n I_n(\mathbf{r}; k) + d_n \quad (4.15)$$

где $c_n = \frac{1}{(I_n^*(\mathbf{r}; k) - I_n^0(\mathbf{r}; k))}$ – масштабный коэффициент;

$d_n = -\frac{I_n^0(\mathbf{r}; k)}{(I_n^*(\mathbf{r}; k) - I_n^0(\mathbf{r}; k))}$ – коэффициент сдвига, корректирующий начало от-

счета;

$I_n^{(n)}, I_n^*, I_n^0$ – нормированное, наибольшее и наименьшее значения критериев.

Использование данных преобразований позволяет привести все критерии к нулевой точке отсчета, их изменение ограничивается отрезком [0, 1], а все критерии получаются безразмерными.

Рассчитаем коэффициенты для показателей качества:

– диапазон измерения октанового числа

$$c_D = 1 \quad d_D = 1.$$

– инструментальная погрешность прибора

$$c_d = 0.862 \quad d_d = 0.345$$

– время затрачиваемое прибором на измерение

$$c_{t_{\text{изм}}} = 1 \quad d_{t_{\text{изм}}} = 0.4$$

Определим евклидовы расстояния между идеальной точкой в пространстве критериев и точками, соответствующими разработанному устройству и базовому образцу:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_n (I_n - I_n^{ид})^2} \quad (4.16)$$

где n – выбранные критерии; I_n – значения выбранных критериев.

За идеальную принимаем точку с координатами $\vec{I}_{\text{ИДЕАЛ}}(x) = [1, 1, 1]$

Определим евклидовы расстояния для критериев для базового образца:

$$\Delta Y^{\text{БАЗ}} = 1,414$$

Определим евклидовы расстояния для критериев для нового изделия:

$$\Delta Y^{\text{НОВ}} = 1,077.$$

Вычислим значение обобщённого показателя эффективности и определим выигрыш эффективности после внедрения устройства измерения октанового числа бензина следующим образом:

$$V_{\text{эф}} = \frac{\Delta Y^{\text{БАЗ}} - \Delta Y^{\text{НОВ}}}{\Delta Y^{\text{БАЗ}}} \times 100\% .$$

С учетом рассчитанных значений значение обобщенного выигрыша составляет 13 %.

Выводы по четвертой главе

1. Предложены отдельные конструкторские решения для прибора контроля качества бензина. Проведен анализ зависимости чувствительности и относительного изменения частоты колебаний от приращения емкости датчика.

2. Разработаны конструкции емкостных датчиков и схема цифрового прибора с автономным питанием для контроля качества бензина, которые внедрены в СКБ ЗАО «Научприбор» (г. Орел) и используются при выполнении ОКР по подготовке производства к выпуску портативных устройств для контроля октанового числа.

3. Разработаны оригинальная структурная схема и конструкция трехпараметрового диэлькометрического прибора для допускового контроля качества бензина, в котором обеспечена высокая чувствительность к электрической проводимости, что позволяет автоматизировать контроль процентного содержания воды в бензине.

4. Исследована инструментальная погрешность прибора, проведен сравнительный анализ с аналогами, методом идеальной точки проведена оценка обобщенного полученного эффекта от использования прибора по сравнению с базовым образцом. Таким образом инструментальная погрешность прибора составляет 1,0 процент, а эффект от его применения 13 %.

5. Проведено исследование применения современной микромощной элементной базы и жидко-кристаллических индикаторов, в ходе которого установлено что с целью уменьшения потребляемой мощности и габаритных размеров аналоговой и цифровой части прибора, необходимо конструктивно размещать цифровые блоки с автономным питанием непосредственно в рукоятке емкостного датчика и обеспечивать универсальность применения для контроля октанового числа бензина.

6. В результате экспериментальных исследований прибора измерения октанового числа получены статистические данные, позволяющие обеспечить контроль топлива в конкретном регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. В результате проведенного анализа свойств и характеристик бензина установлены наиболее значимые параметры для его контроля. При применении диэлькометрического метода измерения в качестве косвенных параметров бензина для определения его октанового числа необходимо использовать относительную диэлектрическую проницаемость, удельную проводимость и температуру.

2. Анализ примесей к бензину и их влияния на его основные характеристики, позволил определить воду, как наиболее существенно влияющую его на эксплуатационные характеристики.

3. Разработана математическая модель процесса измерения диэлектрической проницаемости бензина, основанная на методе частотного резонанса, которая отличается учетом удельной электрической проводимости контролируемого топлива и его температуры с определением частоты резонанса по смене знака фазы выходного сигнала емкостного датчика.

4. На основании сравнительного анализа установлены диапазоны изменения диэлектрической проницаемости для бензинов марки АИ-92, АИ-95, АИ-98, которые составляют значение 2,08–2,295. Получены предельные значения емкости емкостного датчика для допускового контроля бензина изменяется в диапазоне от 184 до 203,5 пФ, определены его граничные частоты 601 кГц и 1623 кГц и установлена частота измерения (1 МГц).

5. В результате теоретических исследований определены условия снижения методической погрешности при определении резонансной частоты измерительного преобразователя в составе колебательной системы по результатам измерений амплитудно-частотных или амплитудно-фазовых характеристик. Необходимым условием для уменьшения методической погрешности определения резонансной частоты контура является применение резонансного режима работы эталонного и рабочего преобразователя в системе связанных контуров.

6. Разработана функциональная схема прибора экспрессного контроля бензина, на основании исследования блоков и узлов функциональной схемы, предложен способ расширения диапазона контроля и повышения чувствительности к контролируемым параметрам.

7. Проведено исследование влияния температуры топлива и удельной проводимости среды на его диэлектрическую проницаемость, обработка статистических данных которого методом нелинейного регрессионного анализа, позволила получить коэффициенты полинома, необходимых для формирования массива корректирующих коэффициентов.

8. Проведена экспериментальная проверка работы алгоритма, в результате которого установлено, что при концентрации воды объемом в 10% для бензина марки АИ-92 за счет ведения поправки по температуре и удельной проводимости погрешность определения октанового числа снижается до значения 1%.

9. Предложены отдельные конструкторские решения для прибора контроля бензина. Проведен анализ зависимости чувствительности и относительного изменения частоты колебаний от приращения емкости датчика.

10. Экспериментальным способом исследовано значение инструментальной погрешность прибора, которая по сравнению с аналогом снижена до значения 0,3 единиц октанового числа. Таким образом эффект от его применения составляет 13 %.

11. Разработаны конструкции емкостных датчиков и схема цифрового прибора с автономным питанием для контроля качества бензина, которые внедрены в СКБ ЗАО «Научприбор» (г. Орел) и используются при выполнении ОКР по подготовке производства к выпуску портативных устройств для контроля октанового числа.

12. Разработаны оригинальная структурная схема и конструкция трехпараметрового диэлькометрического прибора для допускового контроля качества бензина, в котором обеспечена высокая чувствительность к электрической проводимости, что позволяет автоматизировать контроль процентного содержания воды в бензине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бензины, свойства и применения. – Москва: Нефть и газ, 1996.
2. ГОСТ Р.51.105-97 Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин. Издательство стандартов, 1999.
3. Технический регламент. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту. Постановление Правительства Российской Федерации N 118 от 27/02/2008.
4. ГОСТ 511-82 Топлива для двигателей. Моторный метод определения октанового числа. Издательство стандартов, 1982.
5. ГОСТ 8226-82 Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа. Издательство стандартов, 1982.
6. ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88) Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. Издательство стандартов, 2000.
7. Большаков Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. - Л.: Недра, 1982. - 350с.
8. Колесников И.М., Бусенина А.Е. Закономерности повышения октановых чисел бензинов. Нефтепереработка и нефтехимия №1, 1995.
9. В.Н. Астапов. Методологические и схемотехнические решения в системах контроля и управления на нефтеперерабатывающем заводе. – Самара: СНЦ РАН, 2006.
10. Устройство измерения оптических параметров нефтепродуктов. Царев Р.А., Скворцов Б.В., получен 11.04.2005.
11. Устройство измерения расхода, плотности и вязкости и нефтепродуктов. Паршин В.М., Скворцов Б.В., получен 10.09.2007;
12. ВСН-Л Влагометр нефти лабораторный. Рекламный проспект.
13. Камьянов В.Ф., Аксенов В.С., Титов В.И. Гетероатомные компоненты нефтей. - Новосибирск: Наука, 1983, - 240 с.

14. Саблина З А, Гуреев А А Присадки к моторным топливам Изд 3-е пер и доп — М.: Химия, 1997.
15. Конюхов И.Е.. Скворцов Б.В. Приборы и измерительные системы контроля качества - движущая сила для создания цивилизованного рынка электроэнергии и нефтепродуктов. Официальный каталог шестой всероссийской выставки «Энергетика и химиндустрия», Самара, 2000.
16. Астапов В.Н., Бакан Г.М., Коцюба А.Т., Одинцова Е.А Математическое моделирование технологического процесса смешивания бензиновых фракций. Автоматика, 1992.-№5. – 7 с.
17. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике : Пер. с англ. – М. : Постмаркет, 2000.
18. Скворцов Б.В. Обзор и состояние проблемы контроля октанового числа. Сборник научных трудов.НИИ "Приблостроения" .-Самара: СГАУ, 1998.
19. Скворцов Б.В. Электронные приборы измерения октанового числа бензинов.
20. Тезисы доклада XI международной научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик - 99).-Гурзуф, 1999
21. Устройство контроля качества моторного масла. Скворцов Б.В., Бочкарев С.К., Сыгуров А.А., Скворцов Д.Б., получен 26.03.2004;
22. Yorogawa Nokusin Electric Corporation.- Japan.-Токуо.-1997,информационный бюлл. 43B6A1-02R
23. Pat.№ 105448 G.B. Process and apparatus for mixing fluid /Robert Park Newton.- publ. 11.01.1987.
24. Minicomputers improve control in small refineries//Petroleum and Petrochemical/ 1999.
25. Проспект фирмы PETROTECH.
26. Intermediate Ethanol Blends Infrastructure Materials Compatibility Study: Elastomers, Metals, and Sealants. OAK Bridge National library 2010.
27. Карпов Р.Г.,Карпов НР. Электрорадиоизмерения. М.: Высшая школа, 1978.
28. Арш Э. С. Автогенераторные измерения. – М. : Энергия, 1976.

29. Арш Э. С. Автогенераторные методы и средства измерений. - М.: Машиностроение, 1979.
30. Лисичкин В. Г., Наумов Е. Ю. Анализ способов снижения энерго-потребления при автогенераторных измерениях // Вестник РГРТУ. Вып. 22. – Рязань, 2007. – С. 42 – 45.
31. А. с. 1567954 СССР, G01N 27/22. Диэлькометрический анализатор / Ю. В. Подгорный. – Опубл. 30.05.90, Бюл. № 20.
32. Кричевский Е. С., Бензарь В. К., Венедиктов М. В. Теория и практика экспрессного контроля твердых и жидких материалов. - М. : Энергия, 1980.
33. Гурьянова Е.Н., Гольдштейн И.П. Исследование комплексов донорно-акцепторного типа методом диэлектрической поляризации. - Ж. общ. химии, 1962, N1.
34. Скворцов Б.В., Конюхов Н.Е., Астапов В.Н. Приборы и системы контроля качества углеводородных топлив. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
35. ГОСТ 2112-80 Методика выполнения измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот до 0,21 ГГц. Издательство стандартов, 1980.
36. Бурьян В. И., Глаголев В. И., Матвеев В. В. Основы теории измерений. – М.: Атомиздат, 1977.
37. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М. : Наука, 1986.
38. Новицкий П. В., Туричин А. М. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. – Л. : Энергия, 1975.
39. Евтихийев Н. Н., Купершмидт Я. А. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин. М. : Энергоатомиздат, 1990.
40. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1971.
41. Кричевский Е. С., Волченко А. Г., Галушкин С. С.; под ред. Е. С. Кричевского. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов : моногр. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

42. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. / Под ред. Б. Х. Кривитского. – М.: Энергия, 1977.
43. Астров Д. Н., Бацанов С. С., Брегадзе Ю. И. и др. Современные метрологические проблемы физико-технических измерений. – М. : изд. Стандартов, 1988.
44. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин, М: Машиностроение, 1966.
45. Берлинер М. А. Измерения влажности. – М. : Энергия, 1973.
46. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 2000.
47. Лисичкин В. Г. Резонансные измерения параметров окружающей среды : монография. – Орел. : Академии ФСО России, 2011.
48. Лисичкин В. Г. Повышение точности измерений в приборах контроля влажности // Измерительная техника, № 11, 2009. – С. 65 – 68.
49. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / Под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989.
50. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. – М. : Физматлит, 2004.
51. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. – М. : Радио и связь, 1989.
52. Левшина В. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983.
53. Поливанов К.М. Электродинамика вещественных сред. Сборник статей. - М.: Энергоатомиздат, 1988 г.
54. Лисичкин В. Г. Повышение точности измерений в приборах контроля влажности // Измерительная техника, № 11, 2009. – С. 65 – 68.
55. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. АЦП / ЦАП : Пер. с англ. – М. : Техносфера, 2006.
56. Martin Nawrath, DDS Sinewave Generator, Fundamental of video signal and its operation, ISBN4-7898-3624-X.
57. Кричевский Е. С., Бензарь В. К., Венедиктов М. В. Теория и практика экспрес-

- сного контроля влажности твердых и жидких материалов. М. : Энергия, 1980.
58. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. - Л. : Энергия, 1970.
59. Галахова О. П., Колтик Е. Д., Кравченко О. А. Основы фазометрии. – Л.: Энергия, 1976.
60. Скворцов Б.В., Забойников Е.А., Васильев И.Р. Определение электродинамических параметров материалов в широком диапазоне частот «Измерительная техника», № 7,1997.
61. Пат. 2460065 Российская Федерация, G01N 27/22. Устройство измерения октанового числа бензинов .
62. Пат. 2120623 Российская Федерация, G01N 27/22. Емкостный экспресс-влажномер / Г. В. Фролов. – Оpubл. 20.10.98, Бюл. № 28.
63. Будянов В. П. Релаксационные генераторы – импульсные преобразователи неэлектрических величин. – М. : Энергия, 1974.
64. Пат. 2380695 Российская Федерация, G01N 27/22. Устройство измерения октанового числа бензина в бензопроводе автомобиля.
65. Пат. 2380695 Российская Федерация, G01N 27/22. Устройство измерения октанового числа бензина в бензопроводе автомобиля.
66. Пат. 2287811 Российская Федерация, G01N 27/22. Устройство измерения октанового числа бензина с коррекцией от температуры.
67. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Под ред. Евтушенко Ю. Г. – М. : Высш. школа 1982.
68. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров : Пер. с англ.. – М. : Наука, 1984.
69. Сусарев С.В., Астапов В.Н. Вестник. Самарского Государственного технического университета. Серия. - ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. 2011. № 1.
70. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1984.
71. Шалыгин А. С., Палагин Ю. А. Прикладные методы статистического моделирования. – Л.: Машиностроение, 1986.

72. Гурский Д., Турбина Е. Вычисления в MathCad 12: - Питер, 2009 г.
73. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств. – Солон пресс, 2010
74. Соболев, О. С. Развитие АСУ ТП в нефтепереработке и нефтехимии [Текст] : научное издание / О. С. Соболев, А. И. Бирман, М. О. Фикс ; ЦНИИ инф. и техн.-экон. исслед. нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти // Обз. инф. Сер. автоматиз. и контр. измерит. приборы в нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти. - 1988. - N 7. - С. 1-62
75. Поляков С.А., Волков М.А., Иванов Б.Р. Выбор оптимального типа электростатического преобразователя для экспрессного измерения качества бензина. – Научная сессия ТУСУР, 2012.
76. Диденко В.И., Минин А.Г. Датчики температуры и давления со встроенным микропроцессором. //Тезисы доклада X научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-98). Гурзуф, 1998.
77. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. Электронная книга. М., 2003. 278 с.
78. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений : Пер. с нем. / Под. ред. Е. И. Сычева. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
79. Измерения в электронике: Справочник. Т. 1. / Под ред. Доброхорова В. А. – Л. : Энергия, 1965.
80. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Душина Е. М. – Л. : Энергоатомиздат, 1987.
81. Хоффман Л. Дж. Техника измерений и обеспечение качества : Пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
82. Электрические измерения: Средства и методы измерений./ Под ред. Шрамкова Е. Г. – М.: Высш. школа, 1972.
83. Беляев Ю. К. Вероятностные методы выборочного контроля. – М. : Наука, 1975.
84. Шалыгин А. С., Палагин Ю. А. Прикладные методы статистического модели-

рования. – Л.: Машиностроение, 1986.

86. Лозинский Е. Ф. Погрешности измерений и обработка результатов измерений. – М. : Машиностроение, 1967.

87. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для инженеров и научных работников-М.; Наука, 1974.

88. Осипович Л. А. Датчики физических величин. – М. : Машиностроение, 1979.

89. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1991.

90. Пиотровский Я. Б. Теория измерения для инженеров : Пер.с польск.. – М.: Мир, 1989.

91. Куликов Е. И. Методы измерений случайных процессов. – М. : Радио и связь, 1986.

92. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. Ключева В. В. – М. : Машиностроение, 1995.

93. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л. : Энергия, 1970.

94. Каталог микросхем фирмы Atmel, 2006.

95. Хоффман Л. Дж. Техника измерений и обеспечение качества : Пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983.

96. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов .-М.:Наука, 1986,232с.

97. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники.- М.: Мир, 1993.

98. Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике. – М.: Наука, 1989.

99. Фомин А. Ф., Новоселов О. Н., Победоносцев К. А., Чернышев Ю. Н. Цифровые информационно измерительные системы: теория и практика. – М. : Энергоатомиздат, 1996.

100. A. Ertekin and N. Sridhar, “Performance of Elastomeric Materials in Gasoline-Ethanol Blends—A Review,” Paper no. 09533, CORROSION 2009 Annual Conference and Exhibition, NACE International, Atlanta, Georgia.

101. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. – М.: Радио и связь, 1989.
102. Орнатский П. П. Теоретические основы информационной измерительной техники. – Киев : Вища школа, 1986.
103. Справочник конструктора РЭА : общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. – М. : Сов. радио, 1980.
104. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Душина Е. М. – Л. : Энергоатомиздат, 1987.
105. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. – М. : Энергия, 1978.
106. Раннев Г. Г., Тарасенко А. П. Методы и средства измерений. – М. : Изд. Центр "Академия", 2003.
107. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. – Киев : Вища школа, 1979.
108. Новицкий П.В. , Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
109. Измерения в электронике: Справочник. Т. 1. / Под ред. Доброхорова В. А. – Л. : Энергия, 1965.
110. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / Под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989.
111. Осипович Л.А. Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1978.
112. Интегральные микросхемы. Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа. Справочник.- М.: ДОДЭКА, 1996.
113. Крамер Р. Математические методы статистики : Пер. с англ. – М. : Мир, 1975.
114. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. – М. : Наука, 1974.
115. Дубовой Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. – М. : Радио и связь, 1989.
116. Функциональные устройства обработки сигналов. / Под ред. проф. Ю. В. Егорова. – М. : Радио и связь, 1997.

117. Иванов Б. Р., Лисичкин В. Г. Снижение погрешности измерений и потребляемой мощности в приборах резонансного контроля влажности // Измерительная техника, № 1, 2012. – С. 66 – 70.
118. Кушнир Ф. В., Савенко В. Г., Верник С. М. Измерения в технике связи / Под ред. Ф. В. Кушнира. – М. : Связь, 1970.
119. Полулях К. С. Резонансные методы. – М. : Энергия, 1980.
120. Руководство разработчика Atmega 16, Atmel, документация с сайта производителя. 2006.
121. Астапов, В. Н. Применение процессорных измерительных устройств в физико-технических исследованиях [Текст] / В. Н. Астапов, В. В. Плешивцев // Вестн. СамГТУ. – 2009. – № 3 (25). – С. 224–226.
122. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М. : Наука, 1967.
123. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л. : Энергоатомиздат, 1988.
124. Техническое описание ПЭ-7300 М. - ЭКОХИМ.: 2003.
125. Техническое описание Октан ИМ. - Нефть и газ.:2006.
126. Сайт Интернета www.shatox.ru.
127. Lothholz K. Come optimization jas mezclasde gaselians//Petrol Interamericane-2001, v.29-N1,p.26-30.
128. Mischetechnik //Braun and Gubble Nordestedt//Hamburg, 2002.
129. Icerman R. Parametrs adaptive control algoritms//Automatica, 1992 vol.38 №5.
130. Колчин А. В. Оперативная проверка качества и сортности топлива и масла. – ГОСНИТИ. 2004.
131. К. Р. Menard, Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction, 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.
132. Pat. USA, №4708022 «Automatic continios mixed apparatus.» 2010.
133. Hand Held Conductivity Meter, D-2 Incorporated Precision Industrial Sensors,2013.
134. ASTM Standard Test Method D 2624,ASTM Test Method D-2624 Listed, USA 2009.

135. MLA 900 Product information Conductivity measurement in light oil products. United Kingdom, 2011.
136. D. DiCicco, CRC AVFL-15 Project: E20 Durability Study Fuel System Components, presented to the Mid-level Ethanol Blends Research Coordination Group, May 5, 2010.
137. A. Nersasian, "The Use of Toluene/Isooctane/Alcohol Blends to Simulate the Swelling Behavior of Rubbers in Gasoline/Alcohol Fuels," SAE Paper No. 800790.
138. Бочков М. В. Проектирование автоматизированных систем обработки информации и управления / М. В. Бочков, Е. И. Новиков, О. В. Тараканов ; под ред. М. В. Бочкова. – Орел : Академия ФСО России, 2007.
139. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров : учеб. пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М. : Высш. шк., 1994.
140. Шведов С.Н. Метод и средства двухпараметрового резонансного контроля влажности материалов : автореферат диссертации кандидата технических наук : 05.11.13, Орел, 2010.
141. Астапов В.Н. Информационно – измерительные системы для адаптивного управления станциями поточного смешивания товарных бензинов, диссертация на соискание доктора технических наук : 05.13.05, Пенза, 2013

Приложение А

Основные типы примесей и присадок добавляемых в бензин

Присадки принято разделять на следующие категории:

- Антидетонационные;
- Антиокислительные;
- Моющие;
- Противонагарные;
- Противокоррозийные.

Наиболее эффективным и экономически выгодным способом улучшения антидетонационных свойств бензинов является добавление к ним специальных присадок - антидетонаторов. Наиболее эффективные антидетонаторы найдены среди органических производных свинца, олова, таллия, висмута, селена, теллура, марганца, железа, кобальта, никеля, меди, хрома и других металлов. В частности, как антидетонаторы известны алкилы металлов, их карбонилы, внутрикомплексные соли и т.д.

Антиокислительные присадки необходимы для стабилизации бензинов каталитического и термического крекинга, и предназначены для уменьшения скорости процессов окисления в процессе хранения транспортировки и применения топлива.

Моющие присадки предназначены для удаления смолистых отложений которые могут накапливаться в топливной аппаратуре в процессе эксплуатации двигателя. Вследствие этих отложений снижаются технико-экономические показатели работы двигателя: увеличивается удельный расход топлива, растет выброс в атмосферу токсичных продуктов, в частности оксида углерода и углеводородов. Особенно повышается токсичность отработавших газов в этом случае при работе двигателя на холостом ходу, что характерно для эксплуатации автомобилей в городских условиях.

«Противонагарные» присадки. Отложения нагара в камерах сгорания ДВС с искровым зажиганием вызывают повышение требований к детонационной стойкости бензина, снижение надежности работы свечей зажигания и неуправляемое

калильное зажигание. Наибольшую склонность к нагарообразованию проявляют этилированные бензины. Нагарообразование также возрастает с увеличением содержания в бензине ароматических углеводородов.

Противокоррозионные присадки (ингибиторы коррозии) снижают коррозию металла, контактирующего с топливом, независимо от ее вида. Защитные присадки (ингибиторы ржавления) тормозят преимущественно электрохимическую коррозию, возникающую в присутствии влаги. Большая часть противокоррозионных присадок относится к защитным, которые, как правило, также хорошо предотвращают и химическую коррозию металлов. Подавляющее количество защитных присадок и значительная часть всех противокоррозионных присадок, добавляемых к топливам, являются маслорастворимыми и масловодорастворимыми поверхностно-активными веществами (ПАВ).

Отдельной группой влияющей на качество топлива являются примеси. Основными примесями в товарные топлива являются природная грунтовая пыль и вода. В течении жизненного цикла бензина, до попадания его конечному потребителю, бензин многократно контактирует с воздухом, в котором всегда находится определенное количество пыли и других твердых загрязнений. В бензины также попадают продукты коррозии металлов и другие загрязнения из отстоев резервуаров и топливных баков. Эти механические примеси постепенно накапливаются в бензинах.

Частицы механических примесей в бензинах имеют, как правило, неправильную форму и размер не более 60 мкм. Механические примеси большего размера отстаиваются в бензине под действием гравитации.

Основными причинами и источниками загрязнений бензинов механическими примесями являются:

- попадание загрязняющих примесей из атмосферы;
- образование нерастворимых продуктов в результате коррозии металлов и разрушения неметаллических материалов;

- образование нерастворимых продуктов в результате окисления малостабильных компонентов - олефиновых и непредельно - ароматических углеводородов и гетероорганических соединений;

- налив бензинов в плохо зачищенные резервуары и перекачка по грязным трубопроводам;

Основным загрязнителем бензинов является грунтовая пыль. Пыль всегда находится в атмосфере в тех или иных количествах. Она состоит из сухих частиц почвы, поднимаемых ветром. Запыленность воздуха в разных районах весьма различна и зависит от типа почвы, растительности и интенсивности ветров. Большое влияние на запыленность воздуха оказывает интенсивность движения транспорта по грунтовым дорогам. Движущиеся машины измельчают частицы почвы, и образующаяся пыль поднимается ветром в воздух. Чем выше дисперсность пыли, тем больше, как правило, запыленность воздуха. Особенно велико влияние запыленности воздуха на загрязнение топлив в районе нефтебаз.

Грунтовая пыль состоит из частиц разного размера и имеет различный состав. Основным компонентом грунтовой пыли являются окислы кремния (кварц). Следует отметить, что удельная электрическая проводимость кварца (как основного компонента грунтовой пыли), составляет $10^{-14}10^{-16} [Ом^{-1}м^{-1}]$, что делает невозможным определение данной примеси диэлькометрическими способами измерения.

Другим важнейшим источником загрязнений бензина является коррозия резервуаров и трубопроводов, о чем свидетельствует повышенное содержание железа в механических примесях, выделенных из бензинов. Металлы имеют высокую удельную электрическую проводимость, что делает возможным идентифицировать их в товарных бензинах, диэлькометрическим способом даже в очень малых количествах.

В отдельную категорию примесей следует вынести воду. Вода может присутствовать в бензинах в растворенном состоянии и в виде второй (жидкой или твердой) фазы. В растворенном состоянии в бензине может содержаться очень

небольшое количество воды. Даже в наиболее гигроскопичном углеводороде — бензоле растворимость воды при 20°С составляет всего 0,058%. Однако даже в таких количествах растворенная в бензине вода может вызвать нарушения в работе двигателя, особенно при низких температурах.

Содержание воды в автомобильных бензинах зависит как от внешних условий (температура, влажность воздуха, атмосферное давление), так и от углеводородного состава самого бензина. Среди атмосферных условий на растворимость воды в бензинах наибольшее влияние оказывают температура и влажность воздуха. С понижением температуры растворимость воды в углеводородах и бензинах уменьшается. Температурная зависимость растворимости воды в углеводородах и бензинах может быть выражена эмпирической формулой:

$$\lg C = A - \frac{B}{T}$$

где C - содержание воды при температуре T , %, A и B — постоянные, зависящие от углеводородного состава бензина.

Скорость насыщения топлива водой из воздуха и перехода воды из топлива в воздух зависит не только от толщины слоя топлива, но и от отношения площади поверхности соприкосновения топлива с воздухом к объему топлива, залитого в резервуар.

Вода относится к токопроводящим примесям и соответственно может быть выявлена диэлькометрическим способом измерения. Однако при этом необходимо учитывать ряд особенностей. При низких температурах происходит кристаллизация воды - соответственно при этом токопроводящие свойства воды резко изменяются. Соответственно рекомендуется ограничить температурный диапазон измерения границей замерзания воды, так как идентифицировать кристаллизовавшуюся воду в бензине крайне трудно.

Приложение Б

Классификация диэлькометрических измерителей по различным признакам.

По характеру измеряемой входной величины датчика их разделяют на устройства, служащие для измерения *полного сопротивления датчика* и на измерительные устройства с *разделением составляющих*, дающие информацию о значениях реактивной или активной составляющей комплексного сопротивления датчика.

В обеих группах диэлькометрических измерителей находят применение:

- а) *резонансные схемы*, использующие явление резонанса в колебательном контуре с сосредоточенными параметрами, одним из элементов которого является емкостный датчик;
- б) *схемы измерения без использования явления резонанса*: мостовые, дифференциальные и разностные устройства.

Основная разница между обеими категориями заключается в роли, выполняемой генератором высокочастотных колебаний - в резонансных схемах генератор является составной частью измерительной цепи, а в схемах второго типа он служит источником питания измерительной цепи.

К достоинствам резонансных методов измерений относятся высокая чувствительность и значительная помехоустойчивость, которая обусловлена высокими избирательными свойствами резонансных контуров.

В резонансных измерительных приборах генераторы работают, как правило, в режимах переменной нагрузки или перестройки частоты, а информационными параметрами могут являться два параметра - приращение частоты или амплитуды напряжения или тока контура (генератора).

Получило распространение деление резонансных методов измерения на контурные, генераторные и автогенераторные.

В группу с *разделением составляющих полного сопротивления* входят резонансные методы, использующие частотные зависимости.

При контроле качества бензина резонансными методами в качестве косвенных параметров используют амплитуду или частоту резонансных колебаний.

Использование амплитудных зависимостей основано, прежде всего, на свойствах резонансной кривой колебательного контура. У идеального контура на резонансной частоте присутствует ярко выраженный максимум амплитудно-частотной характеристики, а при расстройке частоты кривая резко падает вниз. В области резонанса чувствительность амплитуды к изменениям первичных параметров контура равна нулю. Наибольшая чувствительность достигается при расстройке частоты контура, соответствующей максимальной крутизне резонансной кривой на уровне 0,707 от ее максимального значения.

Активные потери в емкостных датчиках, являющихся элементами колебательных контуров, заметно ухудшают измерительные свойства измерителей, основанных на амплитудных зависимостях. Усилия их разработчиков до настоящего времени направлены, в основном, на уменьшение влияния активной проводимости на точность измерений, повышение быстродействия и чувствительности приборов.

Повышение быстродействия и точности измерений достигается применением стабильного генератора и использованием участка АЧХ с наибольшей крутизной. При этом параметрическая модуляция контура позволяет уменьшить зависимость выходного сигнала - амплитуды напряжения на контуре - от изменения добротности контура, связанной с активными потерями. Однако вследствие значительной нелинейности АЧХ на участке наибольшей крутизны даже использование параметрической модуляции не позволяет обеспечить высокую точность преобразования из-за влияния погрешности нелинейности, которая ограничивает диапазон.

В схемах без параметрической модуляции увеличение точности возможно при измерениях на разных частотах. При двухчастотных измерениях применяют два генератора фиксированных частот, два колебательных контура и емкостной датчик, являющийся общим элементом этих контуров. Для повышения чувствительности выходных напряжений контуры расстроены относительно частот генераторов. Потери в среде существенно зависят от частоты, в то время как диэлектрическая проницаемость среды от значения частоты зависит мало. Совместная

обработка результатов измерений амплитуд сигналов на выходах двух контуров позволяет скомпенсировать влияние активных потерь на достоверность контроля, но только в узком диапазоне ее изменения.

Амплитудные зависимости напряжения от измеряемой величины применяются и в схемах, не использующих явление резонанса.

В таких приборах емкостный преобразователь включают в одно из плеч измерительного моста, и изменение величины вызывает его разбаланс. Напряжение разбаланса является функцией измеряемой величины и после детектирования поступает на индикатор. Схема снабжена дополнительным детектором, вход которого подключен к генератору, а выход – к индикатору. Точность повышается за счет исключения влияния на результат измерения изменений напряжения генератора, происходящих в результате старения элементов питания или бросков напряжения сети 50 Гц. Такая схема пригодна только для измерения сред с малыми активными потерями, так как напряжение разбаланса моста зависит от комплексного сопротивления датчика, поэтому увеличение потерь приводит к повышению погрешности.

Использование амплитудных зависимостей в резонансных и нерезонансных методах измерения не позволяет получить высокой точности измерения в широком диапазоне контроля. Причиной этого положения в резонансных методах является то, что вид резонансной кривой зависит от добротности Q колебательного контура. С ростом потерь в емкостном преобразователе уменьшается высота резонансной кривой, которая становится более широкой и пологой, а ее максимум – расплывчатым, что уменьшает точность и чувствительность определения влажности по максимуму амплитуды выходного сигнала контура в результате влияния потерь в исследуемом материале. При малой добротности контура точность настройки в резонанс по амплитуде колебаний сравнительно невысока, так как на вершине его резонансной характеристики появляется плоский участок. Вследствие этого погрешность существенно зависит от электрического сопротивления

контролируемого материала, и ее значение возрастает при повышении активной электрической проводимости.

В методах, не использующих явление резонанса, функцией измеряемой величины является комплексное сопротивление датчика, активная составляющая которого при значительных потерях в материале начинает преобладать над реактивной, что увеличивает погрешность определения истинной емкости датчика, а значит, и измеряемой величины. Этот недостаток ограничивает применение данных методов измерением среды с малыми активными потерями. Следовательно, при измерении товарных бензинов, характеризующихся большими потерями или проводимостью, резонансные методы обладают преимуществами по сравнению с нерезонансными.

Частотные зависимости при измерениях параметров бензина используются при реализации автогенераторных, контурных и генераторных методов. Автогенераторный метод наиболее часто применяется в варианте метода биений. Частота измерительного генератора, содержащего емкостной датчик, сравнивается с частотой сигнала образцового генератора. Разностная частота, снимаемая с выхода смесителя, преобразуется измерительной схемой в значения измеряемого параметра. Однако такие устройства обладают погрешностью измерений, которая связана с зоной нечувствительности смесителей, составляющей не менее 50–100 Гц. За счет этого в известных устройствах погрешность высокочастотного измерительного тракта достигает примерно 1 – 2%.

Автогенераторные измерители, основанные на принципе сравнения или биения частот, позволяют повысить точность измерения при небольших потерях в среде. Однако при близких значениях сравниваемых частот может возникнуть синхронизация колебаний генераторов из-за паразитной связи между ними, поэтому оба генератора начинают работать на одной частоте даже при разных резонансных частотах настройки их контуров.

При реализации контурных методов применяются высокостабильные кварцевые генераторы с подстройкой частоты резонанса контура компенсирующими элементами (варикапами). Появление баланса определяется по нулевому напря-

жению на выходе амплитудного демодулятора, подключенного к контуру. Необходимость модулирования параметров контура требует наличия дополнительных линий связи между датчиком и измерительным устройством, а погрешность измерения ограничивается снизу порогом срабатывания демодуляторов. Точность контурных методов измерения в области резонанса значительно ниже, чем точность генераторных методов.

Приложение В

Пример расчёта значений коэффициентов коррекции по температуре в системе MathCad

$$n := 5$$

$$T := \begin{pmatrix} 0 & 10 & 20 & 30 & 40 & 50 \\ 2.11043 & 2.10429 & 2.09816 & 2.09202 & 2.08589 & 2.07975 \end{pmatrix}$$

$$Mx := \sum_{i=0}^n T_{0,i} \quad Mx = 150$$

$$Mx2 := \sum_{i=0}^n (T_{0,i})^2 \quad Mx2 = 5.5 \times 10^3$$

$$My := \sum_{i=0}^n T_{1,i} \quad My = 12.571$$

$$Mxy := \sum_{i=0}^n (T_{1,i} \cdot T_{0,i}) \quad Mxy = 313.19$$

$$D := \begin{vmatrix} Mx & n+1 \\ Mx2 & Mx \end{vmatrix} \quad D = -1.05 \times 10^4$$

$$D1 := \begin{vmatrix} My & n+1 \\ Mxy & Mx \end{vmatrix} \quad D1 = 6.442$$

$$D2 := \begin{vmatrix} My & My \\ Mx2 & Mxy \end{vmatrix} \quad D2 = -6.52 \times 10^4$$

$$a := \frac{D1}{D} \quad a = -6.135 \times 10^{-4}$$

$$b := \frac{D2}{D} \quad b = 6.21$$

Приложение Г

Пример расчёта значений коэффициентов коррекции по удельной проводимости в системе MathCad

$\varepsilon_0 := 2.07975$	$\text{och}_0 := 91.4$	$t := 2.08$
		$n := 6$
$\varepsilon_1 := 2.08589$	$\text{och}_1 := 91.6$	
$\varepsilon_2 := 2.09202$	$\text{och}_2 := 91.8$	
$\varepsilon_3 := 2.09816$	$\text{och}_3 := 92$	
$\varepsilon_4 := 2.10429$	$\text{och}_4 := 92.2$	
$\varepsilon_5 := 2.11043$	$\text{och}_5 := 92.4$	

$$l_0(t) := \text{och}_0 \cdot \frac{(t - \varepsilon_1) \cdot (t - \varepsilon_2) \cdot (t - \varepsilon_3) \cdot (t - \varepsilon_4) \cdot (t - \varepsilon_5)}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_4) \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_5)} \quad l_0(t) = 83.179$$

$$l_1(t) := \text{och}_1 \cdot \frac{(t - \varepsilon_0) \cdot (t - \varepsilon_2) \cdot (t - \varepsilon_3) \cdot (t - \varepsilon_4) \cdot (t - \varepsilon_5)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_4) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_5)} \quad l_1(t) = 17.718$$

$$l_2(t) := \text{och}_2 \cdot \frac{(t - \varepsilon_0) \cdot (t - \varepsilon_1) \cdot (t - \varepsilon_3) \cdot (t - \varepsilon_4) \cdot (t - \varepsilon_5)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_4) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_5)} \quad l_2(t) = -17.393$$

$$l_3(t) := \text{och}_3 \cdot \frac{(t - \varepsilon_0) \cdot (t - \varepsilon_1) \cdot (t - \varepsilon_2) \cdot (t - \varepsilon_4) \cdot (t - \varepsilon_5)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_5)} \quad l_3(t) = 11.537$$

$$l_4(t) := \text{och}_4 \cdot \frac{(t - \varepsilon_0) \cdot (t - \varepsilon_1) \cdot (t - \varepsilon_2) \cdot (t - \varepsilon_3) \cdot (t - \varepsilon_5)}{(\varepsilon_4 - \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_5)} \quad l_4(t) = -4.325$$

$$l_5(t) := \text{och}_5 \cdot \frac{(t - \varepsilon_0) \cdot (t - \varepsilon_1) \cdot (t - \varepsilon_2) \cdot (t - \varepsilon_3) \cdot (t - \varepsilon_4)}{(\varepsilon_5 - \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_4)} \quad l_5(t) = 0.691$$

$$L_n(t) := l_0(t) + l_1(t) + l_2(t) + l_3(t) + l_4(t) + l_5(t)$$

+

$$L_n(t) = 91.408$$