

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

© 2012 С. А. Борминский

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Предложен новый показатель для оценки детонационной стойкости углеводородных топлив – комплексный детонационный индекс, зависящий от их электрофизических параметров. Действительная часть индекса определяет детонационную стойкость топлив, мнимая – достоверность (соответствие стандарту). Исследованы зависимости между октановым и цетановым числом топлив с предложенным показателем. Приведена структурная схема прибора для измерений указанных характеристик.

Детонационная стойкость топлива, октановое число, комплексный детонационный индекс, устройство для измерения.

Характеристики углеводородных топлив (бензинов и дизельных топлив) определяют их эффективное сгорание и напрямую связаны с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств. Оперативный контроль качественных характеристик углеводородных топлив без сжигания является актуальной задачей нефтехимической промышленности России.

Основная характеристика жидких углеводородных энергоносителей – детонационная стойкость. Ее мерой являются октановое число для бензинов и цетановое число для дизельных топлив. Оценка антидетонационных свойств бензина проводится методом сравнения их с двумя эталонными соединениями – изооктаном (2,2,4-триметилметаном), стойкость которого условно принята равной 100, и *n*-гептаном стойкостью 0. Смешением изооктана с *n*-гептаном в различных объемах получают промежуточные значения октановых чисел от 0 до 100 единиц. Октановое число выражается процентным содержанием изооктана в смеси с *n*-гептаном, которая при стандартных условиях испытаний детонирует так же, как и контролируемый бензин.

Цетановое число дизельных топлив является аналогом октанового числа бензинов и характеризует воспламеняемость при сжатии. В качестве эталонов для его определения

принимают гексадекан (цетановое число 100) и *a*-метилнафталин (цетановое число 0). Цетановое число численно соответствует содержанию цетана по объему в такой смеси цетана с *a*-метилнафталином, которая в стандартных условиях испытания равноценна по воспламеняемости испытываемому топливу.

Оперативный контроль качества углеводородных топлив важен и актуален для всех участников рыночных отношений – производителей, продавцов и покупателей, так как позволяет контролировать детонационную стойкость косвенным методом без сжигания. Хорошо известны методы и устройства, основанные на контроле диэлектрической проницаемости углеводородных топлив, косвенно связанной с показателями детонационной стойкости [1–4]. Недостатки известных методов состоят в том, что они не позволяют контролировать достоверность топлива, т.е. наличие в нем запрещенных стандартом [5] кислородных и металлосодержащих присадок, с одной стороны, повышающих октановое число, а с другой – ухудшающих экологические характеристики двигателей. Ниже дано теоретическое обоснование для создания устройства, позволяющего оперативно оценивать не только показатели детонационной стойкости, но и достоверность топлива с позиций содержания в нем запрещенных присадок.

Известно, что углеводородное топливо, как все другие среды, обладает комплексной относительной диэлектрической проницаемостью [2]:

$$\epsilon(w) = e'(w) - je''(w) = e'(w)[1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta(w)], \quad (1)$$

где e' – действительная часть, определяющая диэлектрические свойства топлива; $e''(w) = 4ps(w)/(we_0)$ – мнимая часть; $s(w)$ – электрическая проводимость на рассматриваемой частоте w ; $e_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12}$; δ – угол диэлектрических потерь.

В дальнейшем будем предполагать, что измерения проводятся на фиксированной частоте, поэтому частоту при обозначении компонентов диэлектрической проницаемости будем опускать. Мнимая часть в (1) характеризует поглощение энергии (диэлектрические потери) в веществе, введенном в электрическое поле, при этом тангенс угла потерь определяется по формуле $\operatorname{tg} \delta = e''/e'$.

В квазистатической и высокочастотной областях спектра значение ϵ'' практически очень мало. Только в диапазоне $\omega = 10^8 \dots 10^{11}$ Гц (область аномальной дисперсии) значение e'' становится существенным, а при критической частоте ω_0 достигает максимума и определяется процессом релаксации молекулы [6].

Показатели детонационной стойкости и диэлектрическая проницаемость топлив связаны соотношениями [2]:

октановое число Ω бензинов в диапазоне 78 – 100 единиц

$$\Omega = [-6.603 + 6.278e' - 1.470(e')^2] \cdot 10^3; \quad (2)$$

цетановое число Z дизельных топлив в диапазоне 45–54 единиц

$$Z = [-1.391 + 1.797e' - 7.97(e')^2 + 1.1(e')^3] \cdot 10^3. \quad (3)$$

Формулы (2), (3) получены на основе статистических исследований зависимостей октанового и цетанового чисел, соответственно, стандартных бензинов и дизельных топлив от диэлектрической проницаемости с последующей регрессионной обработкой данных. Исследования проводились экспериментально и с помощью математической программы статистического моделирования компонентного состава топлив.

Углеводородное топливо содержит ос-

новные компоненты, определяющие главные показатели качества (детонационную стойкость, теплоту сгорания и др.) и вредные неорганические примеси, например, воду, кислоты и другие кислородосодержащие соединения, имеющие полярные молекулы. В [2, 6] определены предельно возможные сочетания диэлектрической проницаемости, октанового числа стандартных бензинов и цетанового числа дизельных топлив. Основные компоненты топлив, в том числе высокооктановые ароматические углеводороды, имеют диэлектрическую проницаемость в диапазоне $\epsilon' = 1,8 \dots 2,4$ и на частоте $\omega = 10^6$ Гц низкую удельную проводимость $\sigma = 10^{-12} \dots 10^{-14}$ См/м. Тангенс угла потерь на указанной частоте в самых предельных случаях колеблется в диапазоне $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4} \dots 130 \cdot 10^{-4}$. В большинстве случаев для высококачественных топлив можно ограничиться диапазоном $\operatorname{tg} \delta = (5 \dots 30) \cdot 10^{-4}$ [5].

Неорганические примеси (вода, кислоты, щёлочи, спирты) имеют диэлектрическую проницаемость в диапазоне $\epsilon = 3 \dots 80$ и относительно высокую удельную проводимость $\sigma = 10^4 \dots 10^6$ См/м, что на частоте $\omega = 10^6$ Гц соответствует тангенсу угла потерь $\operatorname{tg} \delta = 0,1 \dots 10$ [2]. Таким образом, если в контролируемый бензин попадает неорганическое соединение, то это приводит к одновременному увеличению диэлектрической проницаемости и проводимости. При этом тангенс угла диэлектрических потерь увеличивается значительно больше, чем диэлектрическая проницаемость. Следовательно, контролируя тангенс угла потерь, в общем случае можно судить о причинах повышения диэлектрической проницаемости бензина и вносить коррекцию в результаты измерений октанового числа.

Проиллюстрируем изложенное на примере. Пусть в бензин с диэлектрической проницаемостью e'_0 и тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta_0$ попадает объёмная доля ζ примесей с диэлектрической проницаемостью e'_n и тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta_n$. При этом результирующие диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь смеси будут иметь вид

$$e'_c = (1-x)e'_0 + e'_n x = e'_0 + x(e'_n - e'_0); \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta_c = (1-x)\operatorname{tg} \delta_0 + \operatorname{tg} \delta_n x = \operatorname{tg} \delta_0 + x(\operatorname{tg} \delta_n - \operatorname{tg} \delta_0). \quad (5)$$

Например, если $\epsilon_0' = 2,0$, $tg\delta_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ (что в нормальных стандартных бензинах соответствует октановому числу 78...80), $\epsilon_{II}' = 80$, $tg\delta_{II} = 1$, то при $\zeta = 0,001$ получим $\epsilon_c' = 2,078$; $tg\delta_c = 0,005$. Таким образом, добавление в топливо, например, 0,1 % объёмной доли воды приводит к изменению диэлектрической проницаемости на 3,9 % (что соответствует увеличению октанового числа на 10–12 единиц), а тангенса угла потерь на 25 %. Контролируя изменения тангенса угла потерь можно судить о причинах увеличения диэлектрической проницаемости и корректировать результаты измерения. Более того, ввести показатель подлинности бензина.

Для косвенной оценки топлива без сжигания можно предложить новый показатель качества – комплексный электрофизический детонационный индекс (CDI), связанный с детонационной стойкостью и подлинностью топлива (наличием в нем компонентов, не разрешенных техническими условиями, в частности, неорганических соединений).

Индекс CDI должен удовлетворять следующим требованиям. Он должен состоять из двух составляющих – индексов детонационной стойкости (IDS) и недостоверности топлива (INT), которые можно оценить раздельно количественно, причём принцип измерения должен быть основан на калибровке по эталонным компонентам, применяемым для калибровки моторных установок.

Индекс IDS должен быть косвенно связан с детонационной стойкостью топлива – октановым числом бензинов или цетановым числом дизельных топлив. Изменение IDS в диапазоне 0 – 2,0 должно соответствовать изменению октанового числа от 0 до 200, при этом единица должна соответствовать октановому числу 100.

Индекс INT должен быть косвенно связан с процентным содержанием неорганических соединений в топливе. Изменение INT в диапазоне 0 – 1,0 должно соответствовать вероятности применения в топливе компонентов, не разрешенных техническими условиями, зарегистрированными во Всероссийском научно-исследовательском

институте по переработке нефти (ВНИИ НП).

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

$$CDI = \frac{\epsilon' (1 - jtg\delta)}{\epsilon_0' (1 - jtg\delta_0)} - \frac{\epsilon' [(1 + tg\delta tg\delta_0) + j(tg\delta_0 - tg\delta)]}{\epsilon_0' (1 - tg^2\delta_0)} = IDS - jINT, \quad (6)$$

где

$$IDS = \frac{\epsilon' (1 + tg\delta tg\delta_0)}{\epsilon_0' (1 + tg^2\delta_0)} \quad (7)$$

индекс детонационной стойкости (действительная часть CDI);

$$INT = \frac{(tg\delta_0 - tg\delta)}{\epsilon_0' (1 + tg^2\delta_0)} \quad (8)$$

индекс недостоверности топлива (мнимая часть CDI); ϵ_0' , ϵ' , $tg\delta_0$, $tg\delta$ – диэлектрические проницаемости и тангенсы углов диэлектрических потерь соответственно эталонного и контролируемого топлив.

При этом, в качестве эталонного компонента для бензинов следует признать толуол, который из всех эталонных жидкостей имеет самые близкие к средним значениям для ароматических углеводородов октановое число $\Omega = 108$, диэлектрическую проницаемость $\epsilon' = 2,362$ и тангенс угла потерь $tg\delta_0 = 122,8 \cdot 10^{-4}$ [7]. Таким образом, контролируемые стандартные бензины, имеющие октановое число меньше 108, будут иметь индекс детонационной стойкости меньше 1 и индекс недостоверности, близкий к 0, если в них нет неорганических добавок. В качестве эталонного компонента для дизельных топлив следует принять α – метилнафталин, который при нулевом цетановом числе $Z = 0$ имеет максимальную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_0' = 2,664$ и близкое к среднему для ароматических углеводородов значение тангенса угла потерь $tg\delta_0 = 165,8 \cdot 10^{-4}$ [7].

Таким образом, все стандартные дизельные топлива с $Z > 0$ будут иметь индекс детонационной стойкости меньше единицы и индекс недостоверности, близкий к нулю,

если в них нет неорганических компонентов. Отметим, что для всех углеводородных топлив $tge' < 1$, поэтому для индекса детонационной стойкости можно записать

$$IDS \approx e' / e_3'. \quad (9)$$

Тангенс угла потерь фальсифицированных топлив, как правило, значительно больше стандартного, поэтому индекс недоверности топлива целесообразно выражать мнимой частью CDI, т. е. формулой (8).

На основе проведенных исследований

разработан прибор [9], позволяющий измерять октановое число бензинов, цетановое число дизельных топлив, комплексный детонационный индекс CDI, состоящий из индекса детонационной стойкости IDS и индекса недоверности топлива INT. Прибор позволяет анализировать подлинность топлива с точки зрения наличия в нем недопустимых по [5] неорганических присадок.

Структурная схема прибора изображена на рис.1. Контролируемые показатели вычисляются по формулам (2) – (9).

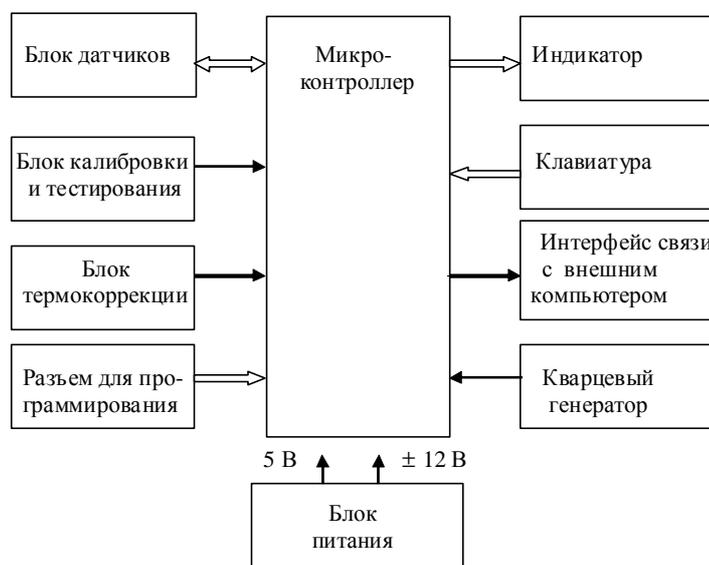


Рис. 1. Обобщенная структурная схема портативного прибора контроля ДСТ

Ядром схемы является микроконтроллер, к которому подсоединяются основные функциональные блоки: датчики, одним из которых обязательно является датчик температуры, входящий в блок термокоррекции, индикатор, клавиатура управления прибором, а также вспомогательные устройства, обеспечивающие возможности связей с программатором и внешним компьютером.

В последнее время появились новые микросхемы, которые можно использовать для прецизионного измерения ёмкости и определения тангенса угла потерь [9]. В частности, для измерения ёмкости в разработанном приборе используется специализированная микросхема AD7747, состоящая из задающего генератора, усилителя с высоким входным сопротивлением и 24-разрядного АЦП. Всё это позволяет измерять ёмкость в

диапазоне 0...8 пФ с точностью до 10 фФ. Благодаря высокой чувствительности микросхемы в качестве ёмкостного датчика выбран коаксиальный конденсатор малых размеров – диаметр составляет 3 см, высота – 2 см. Выбор коаксиальной конструкции датчика обусловлен наибольшей механической стойкостью к внешним воздействиям, что является необходимым для получения высоких метрологических характеристик.

Для определения потерь в разработанном приборе измеряется проводимость среды на постоянном токе. Нефтепродукты являются хорошими диэлектриками, что требует измерения крайне высоких сопротивлений. В частности, сопротивление ёмкостного датчика, погруженного в измеряемую среду, колеблется в зависимости от типа топлива от 10 до 150 ГОм. Точное измерение высоких

сопротивлений требует специальной элементной базы, при этом необходимо тщательно продумывать конструкцию и изоляцию узлов внутри прибора. Для измерения сопротивления выбран операционный усилитель LMC6061, входное сопротивление которого превышает 10 ГОм. Благодаря применению высокоомного операционного усилителя, для измерения сопротивления не требуется высокое напряжение, как в классических

конструкциях подобных измерителей, а достаточно применять напряжение +5В, что упрощает конструкцию прибора.

Для уменьшения влияния помех и сопротивления подключаемых проводов, микросхемы измерения ёмкости и проводимости расположены в непосредственной близости к датчику. Принципиальная схема датчика показана на рис. 2.

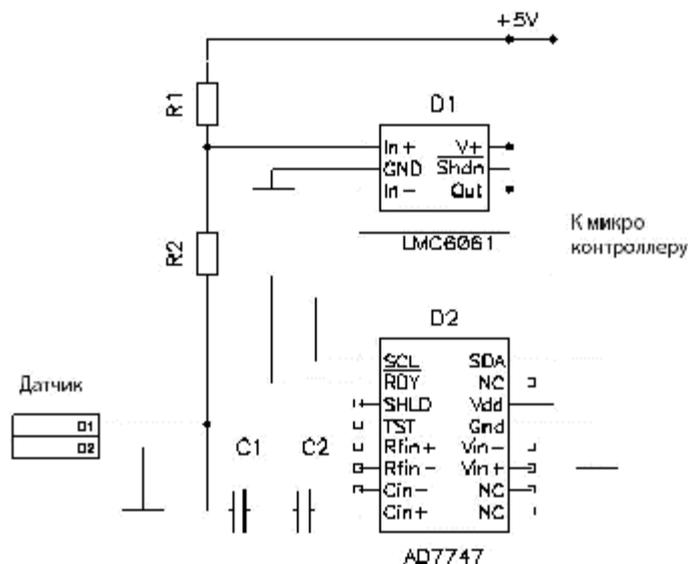


Рис. 2. Принципиальная схема датчика

Резистор $R1 = 10 \text{ ГОм}$ является опорным для измерения проводимости. Резистор $R2$ и конденсаторы $C1, C2$ разделяют переменную и постоянную составляющие сигнала на разные микросхемы.

Для увеличения точности измерений одновременно с формулами (2-9) в приборе используется алгоритм совокупно-косвенных измерений. Сущность алгоритма состоит в том, что происходит уточнение функции вычисления результатов F с помощью калибровочной модели процесса измерения. Решение возможно при условии, что число калибровочных эталонных топлив будет больше одного. Использование только двух эталонных топлив с известным значением исследуемого показателя качества приводит к линеаризации калибровочной модели. Если имеется $n+1$ эталонных топлив с известными показателями детонационной стойкости $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, а также для эталонных топлив из-

вестны измерения соответствующих значений комплексных диэлектрических проницаемостей $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$, тогда уравнение, связывающее искомый показатель качества исследуемого топлива с рассматриваемым электрофизическим параметром определится так:

$$Q_x = b_0 + b_1 q_x + b_2 q_x^2 + \dots + b_n q_x^n + \dots + b_n q_x^n - \sum_{k=1}^n b_k q_x^k \quad (10)$$

Применение вышеописанных формул и схем позволило создать прибор, способный измерять детонационную стойкость с точностью до 0,5%, а полученный индекс достоверности топлива позволяет выявить большинство топлив, изготовленных с нарушениями техпроцесса.

Библиографический список

1. Скворцов, Б.В. Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив [Текст] / Б.В. Сквор-

цов, С.А. Борминский. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – 220 с.

2. Скворцов, Б.В. Приборы и системы контроля качества нефтепродуктов [Текст] / Б.В. Скворцов, Н.Е. Конюхов, В.Н. Астапов. - М.: Энергоатомиздат, 2000. – 226 с.

3. Пат. 2206085. Российская Федерация. Устройство для оперативного измерения октанового числа бензинов [Текст] / Б.В. Скворцов, С.Г. Синников, В.Н. Астапов опубл. 10.2003. Бюл. № 16.

4. Таблицы физических величин. Справ. пособие [Текст] / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

5. ГОСТ Р 2084–77. Бензины автомобильные. Технические условия. [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 2001.

6. Скворцов, Б. В. Исследование кор-

реляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов [Текст] / Б. В. Скворцов, Е.А. Силов /Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. № 5.

7. Шахпаронов, М.И. Жидкие углеводороды и нефтепродукты [Текст] / М. И. Шахпаронов, Л.П. Филиппов – М.: Изд-во МГУ, 1989.

8. Пат. 66542. Российская Федерация. Устройство измерения показателей детонационной стойкости и достоверности углеводородных топлив [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А. Изобретения. Полезные модели. 2007. № 25.

9. Официальный сайт фирмы Analog Devices [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/en/data-converters/products/index.html>

MEASUREMENT OF HYDROCARBON FUELS QUALITY FACTOR. PRECISION INCREASE

© 2012 S. A. Borminsky

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The study suggests a new index to assess hydrocarbon fuels antiknock value. This is a complex antiknock index, which depends on fuels' electrophysical parameters. Actual index part characterizes fuel's antiknock value, virtual part stands for its fit (compliance with standards). The research analyses relationship between octane and cetane number, taking into consideration index suggested. The article presents a structure diagram of measurement device.

Hydrocarbon fuels antiknock value, octane number, complex antiknock index, measurement device.

Информация об авторах

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: b80@mail.ru. Область научных интересов: аналитическое приборостроение.

Borminsky Sergey Anatolyevich, candidate of technical science, assistant professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: b80@mail.ru. Area of research: analytical device construction.