

# ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ОБВОДНЕННОСТИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

А.Н. КАРТАШЕВИЧ, д.т.н., профессор,  
А.Е. КОНДРАЛЬ (БСХА)

**Введение.** Основным источником попадания воды в топливо является атмосферная влага, которая содержится в воздухе в виде водяных паров. При изменении температуры воздуха происходит конденсация влаги на границе раздела фаз и на стенках топливного бака. Кроме того, топливо обладает гигроскопичностью, то есть способностью поглощать воду из окружающей среды. С повышением температуры увеличивается содержание растворенной воды в топливе. При резком уменьшении температуры происходит перенасыщение топлива влагой и образование микрокапель воды по всему объему. Многократное повторение этого процесса приводит к значительному обводнению топлива. Поэтому содержание эмульсионной воды в топливных баках тракторов и автомобилей в 2...12 раз выше, чем в заправляемом топливе [1]. Наличие воды даже в небольших концентрациях резко ухудшает качество топлива - снижаются его смазывающие и противозадирные свойства, что может вызвать заклинивание подвижных деталей топливного насоса и форсунок. Сочетание воды и высокомолекулярных смол приводит к значительному снижению прокачиваемости и фильтруемости топлива. При этом образуется студенистая масса, которая забивает поры фильтровальной бумаги и вызывает резкое возрастание перепада давления в фильтре. В результате ухудшается наполнение надплунжерного пространства топливного насоса, нарушается характеристика впрыска топлива, снижается мощность и экономичность работы дизеля. Вода является причиной набухания и разрушения бумажных фильтрующих элементов. Вследствие этого через микроразрывы на сгибах фильтрующей шторы к прецизионным деталям может поступать неочищенное топливо, способствующее быстрому изнашиванию рабочих поверхностей. Исследования распределения отказов среди основных элементов дизеля показывают, что на систему топливоподачи приходится 25...30% от всех отказов двигателя [2]. При этом количество отказов топливного насоса высокого давления (ТНВД), связанных с работой на обводненном топливе, составляет 9,8% или 4,8% от общего количества отказов топливной аппаратуры (ТА) [3]. Поэтому для повышения надежности топливной аппаратуры дизелей в систему топливоподачи необходимо включить комплекс устройств, которые позволяют предотвратить поступление обводненного топлива к прецизионным деталям. Для решения этой задачи нами разработана система контроля степени обводненности дизельного топлива [4].

Принцип действия системы основан на изменении электрофизических свойств топлива при изменении концентрации воды. Основным элементом устройства является емкостной датчик. Его конструкция состоит из металлических электродов, между кромками которых имеется зазор. К электродам подключается генератор синусоидальных колебаний. Таким образом, емкостной датчик является конденсатором, обкладками которого служат электроды, а диэлектриком поток топлива. Емкость конденсатора определяется его геометрическими размерами и диэлектрическими параметрами изолятора между электродами. При попадании воды в виде непрерывного потока или даже в виде мелкодисперсной эмульсии в зону датчика изменяется его диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Чтобы установить чувствительность предлагаемой системы контроля степени обводненности топлива, необходимо исследовать изменение падения напряжения на емкостном датчике при различном содержании воды в топливе.

**ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Объектом исследований является разработанная нами система контроля степени обводненности дизельного топлива. Исследования проводились с целью определения основных параметров емкостного датчика, влияющих на работоспособность данной системы, а также для оценки минимальной чувствительности устройства к наличию воды в топливе.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.** Падение напряжения на емкостном датчике в электрической схеме системы защиты определяется его полным сопротивлением, которое можно определить по зависимости [5]:

$$Z = \frac{1 + tg\delta}{\omega C tg\delta}, \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая частота колебаний,

$C$  - емкость конденсатора,

$tg\delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь.

Приведенное выражение показывает, что при постоянной частоте сигнала полное сопротивление датчика зависит от угла диэлектрических потерь и емкости датчика. Это потребовало разработки датчика специальной конструкции, обладающего достаточно большой емкостью и малым углом диэлектрических потерь.

Для определения влияния содержания воды в топливе на электрофизические параметры датчика с помощью генератора электрических сигналов, осциллографа С1-118 и

измерительного прибора Е12-2 исследовалась зависимость его емкости и тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации водо-топливной эмульсии при частоте сигнала  $f = 1000$  Гц. По этим данным вычислялось его полное электрическое сопротивление. Чувствительность предлагаемого метода определения наличия воды в топливе можно оценить, если установить степень обводненности, при которой изменение сопротивления датчика является достаточно заметным. Величина частоты электрического сигнала при этом выбиралась исходя из предварительных исследований, а также рекомендаций [6]. Так как зависимость полного электрического сопротивления датчика от частоты в диапазоне  $1000 \dots 4000$  Гц близка к линейной, данный интервал частот наиболее целесообразно использовать для определения наличия воды в топливе.

Для повышения чувствительности системы защиты дизеля от попадания воды в цилиндры нами предлагается использовать явление резонанса. Для этого заполненный чистым обезвоженным топливом датчик соединяется с индуктивностью, которая образует с ним колебательный контур. Если подключить данный контур к генератору электромагнитных колебаний, то при определенной частоте сигнала в схеме возникнет резонанс. Падение напряжения на емкостном датчике достигнет при этом максимального значения и определяется диэлектрическими потерями в колебательном контуре [7]:

$$U_2 = \frac{U_1}{tg\delta}, \quad (2)$$

где  $U_1$  - входное напряжение генератора,  
 $U_2$  - падение напряжения на емкостном датчике.

Даже незначительное содержание воды в топливе приводит к изменению емкости датчика и тангенса угла диэлектрических потерь. Тангенс угла диэлектрических потерь обуславливается отношением реактивного сопротивления датчика к его активному сопротивлению. Реактивное сопротивление зависит прежде всего от изменения диэлектрической проницаемости топлива в присутствии воды и частоты колебаний генератора. С повышением концентрации воды в топливе диэлектрическая проницаемость увеличивается, поэтому реактивное сопротивление становится меньше. Активное сопротивление определяется проводимостью эмульсии, которая возрастает с повышением объемного содержания воды и напряжения, приложенного к датчику, так как увеличиваются утечки тока между его обкладками.

Малейшее изменение емкости конденсатора в колебательном контуре за счет обводнения топлива выводит схему из резонанса и приводит к существенному изменению падения напряжения. Падение напряжения на датчике при этом можно определить следующим образом:

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(C_0^2 tg^2 \delta + 2C_0(C_1 - C_0)tg^2 \delta + (C_1 - C_0)^2(1 + tg\delta))}}, \quad (3)$$

где  $C_1$  - емкость датчика, заполненного обводненным топливом,

$C_2$  - емкость датчика, заполненного чистым топливом.

Изменение падения напряжения на датчике с повыше-

нием степени обводненности топлива определяет чувствительность всей системы контроля содержания воды в топливе. Поэтому необходимо определить такое значение входного напряжения, при котором система будет иметь максимальную чувствительность.

На первом этапе были исследованы два варианта резонансных контуров: параллельный и последовательный. При этом были определены зависимости падения напряжения в параллельном колебательном контуре  $U_1$  (В) и в последовательном колебательном контуре  $U_2$  (В) от содержания воды в топливе  $W$  % при напряжении генератора синусоидальных колебаний  $U_3$  равном 1 В. Полученные данные позволяют судить о том, какое подключение целесообразно использовать в системе контроля содержания воды в топливе.

Для определения оптимального режима работы емкостного датчика определена зависимость резонансного напряжения на емкостном датчике от входного напряжения генератора при концентрации воды в топливе, изменяющейся в пределах  $0 \dots 0,08$  % по объему. Учитывая, что устройство для определения обводненности топлива рассчитано для работы на автотракторных дизелях, наиболее рационально для питания резонансного контура использовать генератор электромагнитных колебаний, работающий от бортовой сети машины, который может генерировать неискаженное синусоидальное напряжение в пределах  $0,1$  В. Зависимость резонансного напряжения при последовательном подключении датчика  $U_2$  от входного электрического напряжения  $U_3$  определялась в измерительной схеме, которая включает в себя колебательный контур, осциллограф и цифровой милливольтметр В7-27А/1. Исследования проводились в следующем порядке:

- в емкостной датчик подавалось чистое обезвоженное топливо;
- перед проведением измерений с помощью катушки с переменной индуктивностью в колебательном контуре устанавливалось максимальное резонансное напряжение;
- с помощью генератора синусоидальных сигналов изменялось входное электрическое напряжение  $U_3$ , точное значение которого определялось цифровым милливольтметром;
- в датчик подавалась эмульсия различной концентрации и по осциллографу определялось изменение резонансного напряжения  $U_2$ .

Затем был проведен регрессионный анализ полученных данных. В процессе регрессионного анализа каждый дополнительный член уравнения по критерию Фишера сравнивался с ошибкой наблюдения. Оценка доли регрессии в общем рассеянии значений функции определяется корреляционным отношением. Чем ближе корреляционное отношение к единице, тем более точно полученное уравнение регрессии оценивает действительное распределение случайной величины возле линии регрессии. Достоверность коэффициента корреляции оценивалась по критерию Стьюдента.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В процессе разработки системы контроля степени обводненности дизельного топлива нами были исследованы два вариан-

цессе разработки системы контроля степени обводненности дизельного топлива нами были исследованы два варианта резонансных контуров: параллельный и последовательный. При заполнении датчика чистым обезвоженным топливом его емкость составляет  $C = 592$  пФ, а тангенс угла диэлектрических потерь -  $tg\delta = 0,009$ . Зависимости падения напряжения на емкостном датчике при разных способах подключения его в колебательный контур представлены на рис. 1. Данные исследования показали, что при последовательном подключении датчика падение напряжения на нем с увеличением обводненности топлива изменяется в большей степени, чем при параллельном. Так, при изменении концентрации воды в топливе с 0,01% до 0,1% при последовательном подключении датчика падение напряжения  $U_2$  уменьшается с 11 В до 7,4 В или на 3,6 В. В то время как для параллельного подключения датчика изменение концентрации воды в этих же пределах вызывает снижение падения напряжения  $U_1$  с 3,1 В до 2,3 В, то есть всего на 0,8 В. Это свидетельствует о том, что чувствительность схемы в случае последовательного соединения значительно выше, поэтому в системе контроля степени обводненности топлива нами предлагается последовательное подключение колебательного контура.

Для определения оптимального режима работы емкостного датчика нами определена зависимость резонансного напряжения на емкостном датчике  $U_2$  от входного напряжения генератора  $U_3$  при концентрации воды в топливе, изменяющейся в пределах 0...0,08 % по объему (рис. 2). Полученные данные показывают, что повышение входного напряжения  $U_3$  вызывает соответствующее увеличение напряжения  $U_2$  при различных значениях концентрации воды в топливе. При этом все зависимости имеют точку перегиба, вблизи которой зависимость  $U_2 = f(U_3)$  близка к линейной. Это позволяет предположить, что при некотором значении входного напряжения изменение резонансного напряжения для определенной концентрации воды в топливе будет максимальным. При повышении напряжения выше этого значения чувствительность устройства падает из-за возрастания тока утечки. При уменьшении входного напряжения чувствительность устройства также снижается из-за уменьшения напряженности электромагнитного поля внутри емкостного датчика. Для определения зоны максимальной чувствительности датчика был проведен регрессионный анализ зависимости  $U_2 = f(U_3)$  для различных значений концентрации воды в топливе, который показал, что резонансное напряжение функционально связано с выходным напряжением генератора в виде многочлена ледующего вида

$$U_2 = A_0 + A_1 U_3 + A_2 U_3^2 + A_3 U_3^3 \quad (4)$$

где  $A_0, A_1, A_2$  и  $A_3$  - коэффициенты, зависящие от содержания воды в топливе.

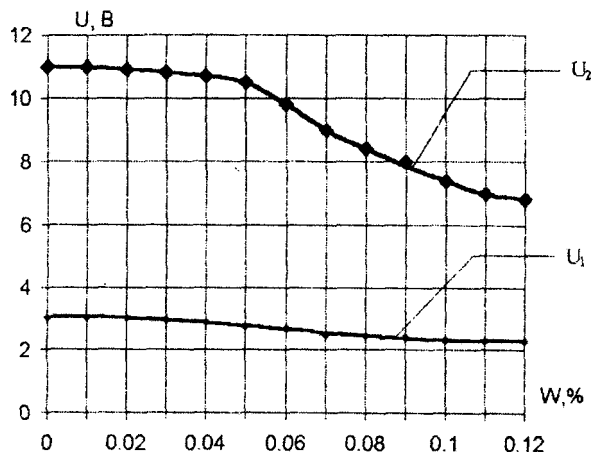


Рис. 1. Зависимость падения напряжения в параллельном контуре  $U_1$ (В) и в последовательном колебательном контуре  $U_2$ (В) от содержания воды в топливе  $W$ (%).

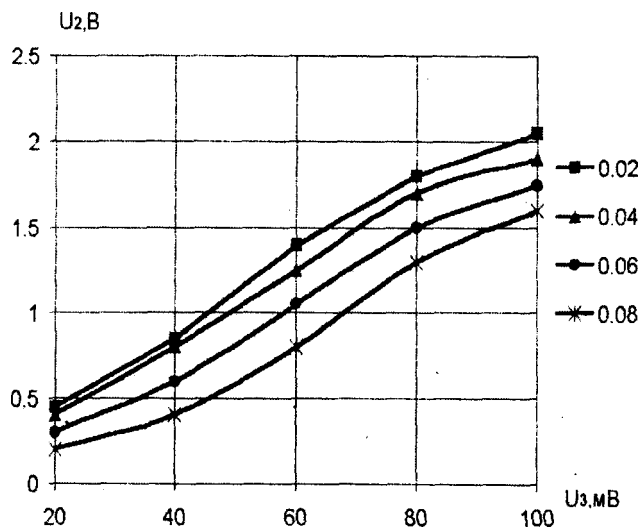


Рис. 2. Зависимость падения напряжения на емкостном датчике  $U_2$  от входного напряжения электрической схемы  $U_3$  при различной концентрации воды в топливе.

Значение коэффициентов  $A_0, A_1, A_2$  и  $A_3$ , а также множественный коэффициент корреляции  $R_0$  для эмульсии различной концентрации приведены в таблице.

Среднеквадратическая ошибка коэффициента корреляции для полученных уравнений регрессии находится в пределах  $\alpha = 0,018...0,026$ . Значения множественного коэффициента корреляции показывают, что функция (4) достаточно точно устанавливает зависимость падения напряжения на датчике от входного напряжения генератора. Зона максимальной чувствительности находится вблизи точки перегиба функции  $U_2 = f(U_3)$ , которую можно определить, приравняв производную выражения (4) к нулю. В этой области тангенс угла наклона касательной к функции имеет максимальное значение. Полученные данные показали, что напряжение, при котором чувствительность

датчика будет максимальна, находится в пределах 55...65 мВ.

Зависимость резонансного напряжения  $U_2$  от содержания воды в топливе  $W$  при напряжении генератора

нне датчика уменьшается от 185 до 62 Ом, то есть почти в 3 раза. Изменение электрического сопротивления датчика приводит к соответствующему снижению падения напряжения  $U_2$  и срабатыванию системы защиты.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Регрессионный анализ

полученных данных на персональном компьютере показал, что резонансное напряжение функционально связано с выходным напряжением генератора в виде многочлена 3-й степени. Аналитический и графический анализ функции позволяет сделать вывод, что имеется зона функции, в которой чувствительность датчика к обводненности топлива максимальна.

**1. Результаты регрессионного анализа функции  $U_2 = f(U_1)$**

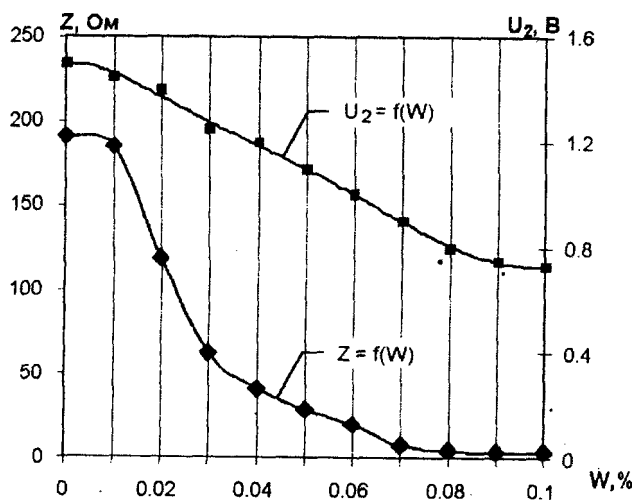
W%	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	Коэффициент корреляции $R_c$	Критерий Стьюдента $t$	Критерий Фишера $F_{1,3}$
0,02	0,26	0,88	488,4	-3127	0,99	63,2	3,85
0,04	0,30	-3,58	509	-3125	0,99	44,65	5,7
0,06	0,34	-13,2	638,7	-3647	0,99	63,2	7,29
0,08	0,46	-27,3	804,1	-4170	0,99	63,2	6,26

$U_3 = 60$  мВ приведены на рис.3 (линия 1). Как видно из представленной зависимости, изменение падения напряжения  $U_2$  является достаточно заметным при увеличении содержания воды в топливе свыше 0,01 %. Так, при повышении объемной концентрации воды от 0 до 0,02 % падение напряжения на датчике составляет 0,3 В. Это позволяет сделать вывод о том, что данное устройство при входном напряжении  $U_3$  в пределах 55...65 мВ реагирует на содержание воды в топливе, превышающее 0,01 %.

Для определения влияния содержания воды в топливе

При повышении напряжения выше этой зоны чувствительность устройства падает из-за возрастания тока утечки. При уменьшении входного напряжения ниже этой зоны чувствительность устройства также снижается из-за снижения напряженности электромагнитного поля внутри емкостного датчика.

Таким образом, проведенные исследования показали, что конструкция емкостного датчика во многом определяет его чувствительность к низким концентрациям воды в водотопливных эмульсиях. Датчик, выполненный в отдельном корпусе с малым углом диэлектрических потерь, способен надежно регистрировать концентрацию воды в топливе свыше 0,01...0,03 %.



*Рис. 3. Зависимость выходного напряжения  $U_2$  (линия 1) и полного электрического сопротивления  $Z$  (линия 2) от содержания воды в топливе.*

на электрофизические параметры датчика на приборе Е12-2 исследовалась зависимость его емкости и тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации водотопливной эмульсии при частоте сигнала  $\omega = 1000$  Гц и напряжении  $U_3 = 60$  мВ. По этим данным вычислялось его полное электрическое сопротивление  $Z$  (рис. 3.), которое соответствует падению напряжения на датчике в электрической цепи. Из графиков видно, что с ростом объемного содержания воды от 0,01% до 0,03% за счет увеличения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь полное сопротивле-

**Литература**

1. Рыбаков К. В., Удлер Э. И., Шевченко В. П. Повышение чистоты в расходных баках двигателей. // Двигателестроение. – 1985. – №7. – С. 48...52.
2. Безбородов В. В. Характерные отказы топливных насосов УТН-5А/5П // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – №2. – С. 22...23.
3. Фельдман Л. Б., Мылов А.А., Новиков В. В. Оценка надежности отремонтированной топливной аппаратуры УТН и ЛСТН.// Труды ГОСНИТИ. М. 1988. – Т. 84. – С.164...168.
4. Пат. 2028481 Россия, 6 ф 02 В 7700. Система защиты дизеля от попадания воды в цилиндры/ Карташевич А.Н., Кожушко В.К., Кондраль А.Е. Заявл. 26.03.92. №5034497/06; Оpubл. 9.02.95, //Открытия. Изобретения. – 1996. – №6.
5. Эме Ф. Диэлектрические измерения. – М.: Химия, 1967. – 223с.
6. Куркова З. И. Исследование и использование диэлектрических свойств нефти и водонефтяной эмульсии при эксплуатации нефтепроводов и нефтебаз: Дисс. ... канд. техн. наук. – М. 1979. – 193 с.
7. Калашников И. Н. Электричество: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1989. – 365 с. ил.