

УДК 621.317.7

Анализ дополнительных погрешностей ёмкостных датчиков систем заправки ракет-носителей

Захаров Р.С.*, Скворцов Б.В., Таипова Д.Р.*****

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

**e-mail: roman_zaharov-63@mail.ru*

***e-mail: aps@ssau.ru*

****e-mail: nil54@list.ru*

Статья поступила 25.11.2019

Аннотация

В статье рассмотрена проблема унификации технологического оборудования ракет-носителей семейства «Союз», заключающаяся в том, что в процессе модернизации появилась большая номенклатура оборудования космодромов и модификаций ракет-носителей, но при этом в настоящее время между ними не предусмотрена совместимость, т.е. более новая модификация ракеты-носителя не может подключиться к технологическому оборудованию космодрома предыдущего поколения. В рамках решения данной проблемы в области оборудования для измерения уровня заправки, в статье предложен универсальный ёмкостный датчик уровня заправки с компенсационной секцией для космодрома «Восточный» и схема его подключения, а также проведен анализ дополнительных погрешностей ёмкостных датчиков.

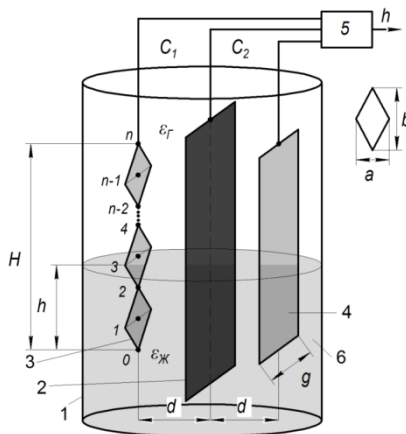
Ключевые слова: ракета-носитель, ёмкостной датчик, измерение уровня топлива.

В ракетно-космической отрасли России существует проблема унификации технологического оборудования ракет-носителей (РН) «Союз», заключающаяся в том, что в процессе модернизации появилась большая номенклатура оборудования космодромов и модификаций РН, но между ними не предусмотрена совместимость. Это приводит к повышению расходов на содержание, а, следовательно, и к повышению себестоимости запуска РН. Наилучшим выходом в данной ситуации является модернизация существующего комплекта технологического оборудования космодромов таким образом, чтобы один и тот же комплект можно было использовать с разными модификациями РН. Проблема унификации оборудования актуальна для развития ракетно-космической промышленности [1-2], в частности, если говорить о системах измерения уровня заправки, задача стоящая в данной области подробно изложена в [3]. Суть её заключается в том, что существует два типа датчиков уровня заправки, установленных на разных модификациях РН «Союз-2»: 1) для космодромов «Байконур», «Плесецк» и Гвианского космического центра (ГКЦ); 2) для космодрома «Восточный». Датчик модификации «1» представляет собой ёмкостной датчик, с коаксиально расположенными обкладками конденсатора. Его ёмкость варьируется от 100 до 250 пФ, а также он имеет 2 измерительных канала (основной и дублирующий). Датчик модификации «2» представляет собой также ёмкостной датчик, однако его обкладки выполнены в виде плоских пластин и имеют ёмкость от 8 до 12 пФ в сухом состоянии. Данный датчик имеет 3 измерительных канала и каждый канал дополнительно оснащен компенсационной секцией, расположенной ниже измерительной и служащей для учета и компенсации

нестабильности диэлектрической проницаемости контролируемой среды. Такие отличия в датчиках внесли и различия в наземном оборудовании системы измерения уровня заправки. На космодромах «Байконур», «Плесецк» и «ГКЦ» установлены измерительные крейты, опрашивающие датчики уровня заправки (ДУЗ) через длинную (до 420 м) линию связи. На космодроме «Восточный» из-за малой ёмкости ДУЗ опрашивать датчики через длинный кабель затруднительно, в связи с этим на борту РН были установлены бортовые измерители уровня (БИУ), которые опрашивают ДУЗ, и передают в наземную аппаратуру сигнал в цифровом виде. Ввиду разного принципа передачи данных от РН возникает несовместимость систем заправки.

Существует два направления решения данной проблемы. Первое направление связано с разработкой нового универсального датчика уровня заправки, обладающего свойствами, необходимыми для применения на всех видах РН. Второе заключается в разработке устройств адаптации наземного и бортового оборудования систем заправки различных РН и стартовых комплексов. Учитывая, что во всех видах РН, использующих различные виды датчиков уровня, существует разъём для подключения наземной кабельной сети, целесообразно в момент заправки вместо кабеля подключать универсальный блок, преобразующий аналоговый сигнал датчика в цифровой код, затем передающий его в пульт оператора по радиоканалу. В случае цифрового сигнала датчика с РН этот универсальный блок будет выполнять только функцию передачи по радиоканалу. Использование такого универсального блока также позволит применять аналоговые датчики с малой

ёмкостью, также при этом отказаться от БИУ на борту, что дополнительно сэкономит внутреннее пространство и вес РН. В рамках реализации первого направления, разработан новый датчик уровня заправки с самокалибровкой, представленный на рисунке 1.



1 - корпус, 2 - центральный электрод, 3 - профильный электрод, 4 - прямоугольный электрод, 5 - устройство обработки, 6 - топливо; $\epsilon_{Ж}$, $\epsilon_{Г}$ - диэлектрическая проницаемость жидкости и газа

Рисунок 1 – Измерительный элемент ёмкостного датчика уровня заправки РН.

При наполнении датчика закон изменения емкостей будет иметь вид, показанный на рисунке 2. Ёмкость C_2 линейно нарастает в зависимости от уровня жидкости h , что определяется линейным увеличением погружённой в жидкость площади перекрытия центрального 2 и прямоугольного 4 электродов. В тоже время ёмкость $C_1(h)$, образованная профилированным электродом, нелинейно изменяется в зависимости от профиля электродов и пересекает линейную функцию $C_2(h)$ в определённых точках, место положения которых в диапазоне преобразования определяется исключительно геометрией электрода 2.

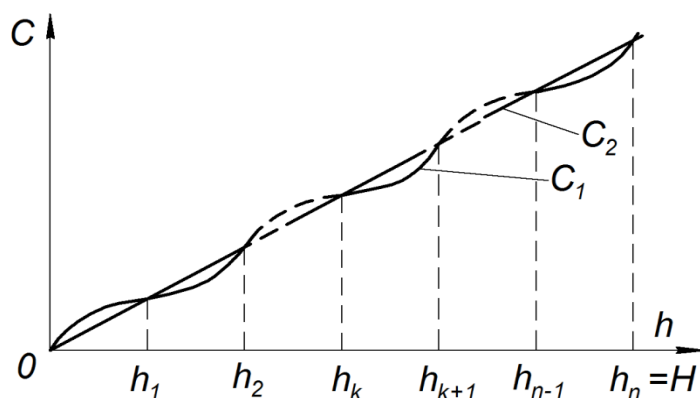


Рисунок 2 – Иллюстрация к формированию реперных точек в датчике.

Таким образом, в момент равенства емкостей $C_1 = C_2$ мы имеем в диапазоне преобразования калибровочные (реперные) точки, соответствующую точному значению уровня жидкости, определяемую вершинами и серединами составных ромбов профильного электрода. Если нам нужно определить уровень в диапазоне, находящемся между точками калибровки при $(k-1)b \leq h \leq kb$, то это делается по следующей методике.

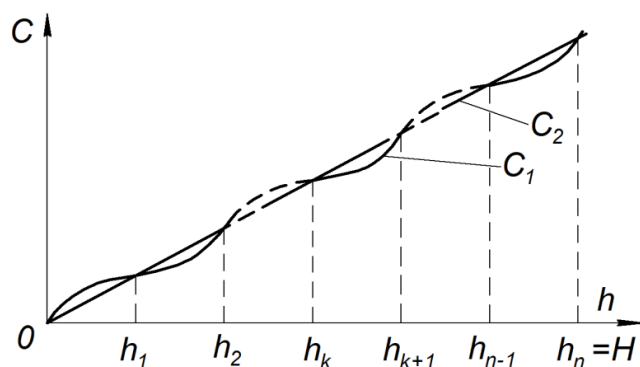


Рисунок 3 – Иллюстрация к формированию реперных точек в датчике.

Измерим и запомним значение ёмкости C_2 в реперных точках h_{k-1} , h_k :

$$C_{2,k-1} = \frac{\varepsilon_0}{d} [\varepsilon_r S_0 + (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r) g h_{k-1}] + C_{II} = A_{k-1} + B_{k-1} h_{k-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } A_{k-1} = \frac{\varepsilon_0}{d} \varepsilon_r S_0 + C_{II}, \quad B_{k-1} = \frac{\varepsilon_0}{d} (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r) g,$$

$$C_{2,k} = \frac{\varepsilon_0}{d} [\varepsilon_r S_0 + (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r)gh] + C_{II} = A_k + B_k h_k, \quad (2)$$

где $A_k = \frac{\varepsilon_0}{d} \varepsilon_r S_0 + C_{II}$, $B_k = \frac{\varepsilon_0}{d} (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r)g$.

Так как на двух соседних участках калибровочной характеристики коэффициенты A и B изменяются незначительно можно записать: $A_{k-1} \approx A_k \approx A$, $B_{k-1} \approx B_k \approx B$. Допущение вполне оправдано, так как паразитные ёмкости, температура и другие изменения электрофизических свойств среды не могут сильно меняться в течении заполнения межкалибровочного интервала. Можно составить систему уравнений для определения текущих значений коэффициентов A , B , получаемых в результате измерений емкостей в соседних реперных точках.

$$C_{2,k-1} = A + B h_{k-1}, \quad C_{2,k} = A + B h_k. \quad (3)$$

Решая эту систему относительно A и B , получим:

$$B = \frac{C_{2,k} - C_{2,k-1}}{h_k - h_{k-1}} = \frac{C_{2,k} - C_{2,k-1}}{b}, \quad (4)$$

$$A = C_{2,k} - B h_k = C_{2,k} - \frac{(C_{2,k} - C_{2,k-1})h_k}{b} = C_{2,k} - (C_{2,k} - C_{2,k-1})k$$

Последнее равенство получилось с учетом того, что $h_k = kb$. Текущее значение измеренной емкости $C_{2,k}$ при изменении уровня в интервале $(k-1)b \leq h \leq (k+1)b$ определится по формуле: $C_2(h) = A + Bh$. (5)

Отсюда
$$h = \frac{C_2(h) - A}{B} = \frac{C_2(h) - C_{2,k} + (C_{2,k} - C_{2,k-1})k}{(C_{2,k} - C_{2,k-1})} b. \quad (6)$$

Проверим: при $C_2(h) = C_{2,k-1}$, $h = h_{k-1} = (k-1)b$;

$$\text{при } C_2(h) = C_{2,k}, \quad h = h_k = \frac{C_{2,k} - C_{2,k} + (C_{2,k} - C_{2,k-1})k}{(C_{2,k} - C_{2,k-1})} b = kb;$$

$$\text{при } C_2(h) = C_{2,k+1}, \quad h = h_{k+1} = \frac{C_{2,k+1} - C_{2,k} + (C_{2,k} - C_{2,k-1})k}{(C_{2,k} - C_{2,k-1})} b = \frac{\Delta C + \Delta C k}{\Delta C} b = (k+1)b.$$

Таким образом показано, что текущий уровень жидкости определяется только значениями ёмкостей, измеренных в реперных точках в текущих климатических условиях в процессе заправки и не зависит от паразитных ёмкостей соединительных проводов и электрофизических свойств среды, участвующей в измерительной процедуре. Это позволяет значительно снизить погрешности измерений, так как в отличие от прототипа, где калибровочные данные, несущие в себе информацию о электрофизических свойствах среды, определяются только в одной начальной точке диапазона преобразования, здесь калибровочные данные оперативно обновляются при движении зеркала жидкости. Устройство не требует ввода в память каких-либо априорных данных о электрофизических свойствах жидкости и газа, автоматически учитывает климатические факторы, криогенное укорочение электродов и капиллярные явления.

Так как разъём для подключения наземной кабельной сети, соединяющей датчики уровня заправки с измерительной аппаратурой присутствует на всех типах РН имеет смысл заменить её на радиоканал. При этом от БИУ на борту отказаться, а перенести его функции в этот съёмный блок. В рамках данного направления развития разработана система измерения уровня заправки, оформленная заявкой на изобретение [4]. Здесь решалась следующая задача: расширить функциональные возможности систем заправки, с точки зрения их применения на разных видах

ракет-носителей и стартовых комплексов и устранить гальваническую связь между бортовой и наземной частями системы. Сущность изобретения поясняется рисунком 4, где изображена упрощённая структурная схема системы заправки ракеты-носителя, содержащая следующие элементы: 1 - бак окислителя, 2 - бак горючего, 3 - ДУЗ окислителя, 4 - ДУЗ горючего, 5 - бортовая кабельная сеть, 6 - внешний бортовой разъём, 7 - микропроцессорное устройство обработки и передачи данных, 8 - линия связи, 9 - радиомодули, 10 - блок обработки, 11 - пульт оператора.

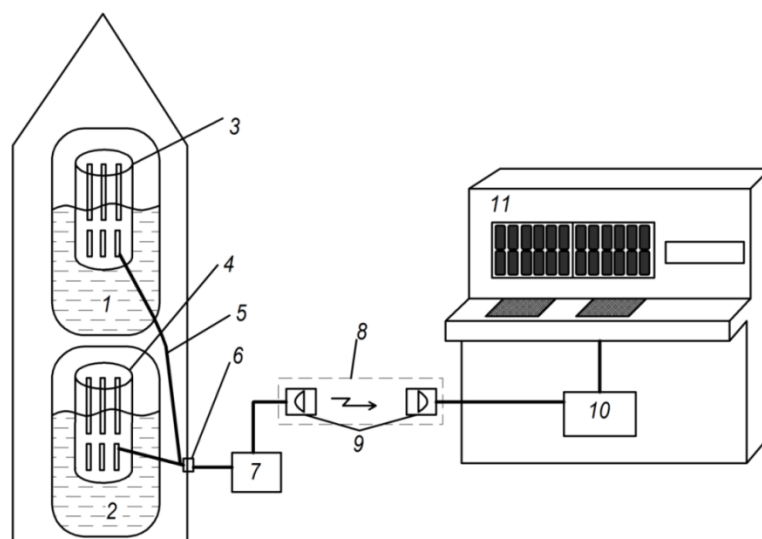


Рисунок 4 - Система измерения уровня заправки с радиоканалом.

Система измерения уровня заправки работает следующим образом. При подаче топлива в баки окислителя 1 и горючего 2, размещённые на борту датчики уровня 3, 4. выдают аналоговые сигналы в виде изменения емкости, напряжения или частоты, в зависимости от конкретного вида используемого датчика. Эти сигналы передаются по бортовой кабельной сети 5 на выходной разъём 6, к которому подключается микропроцессорное устройство обработки и передачи данных (сигнальный контроллер) 7. Осуществляя аналого-цифровое преобразование

сигналов и предварительную обработку данных по каким-либо алгоритмам, зависящим от типа используемых датчиков, контроллер передаёт результаты на вход радиомодуля 8. Радиомодуль состоит из передатчика, расположенного на плате контроллера 7 и приёмника, размещаемого в микропроцессорном блоке приема и обработки информации (приёмного контроллера) 10, расположенного на пульте оператора 11. Информация об уровне топлива передается по радиоканалу 9 на частотах, предусмотренных маркой применяемого радиомодуля 8. Выбор программы приема и обработки сигналов в контроллере 7, а также ввод исходных данных, связанных с учётом конструкционных параметров датчиков осуществляется со встроенной в него панели управления. Радиомодуль является многоканальным и может передавать информацию на пульт оператора от каждого бака РН и от каждого датчика в отдельности. Переданная на пульт оператора информация используется для визуального и автоматического контроля уровня заправки и передаётся в другие системы управления РН. Отметим, что функции первичной и последующей обработки измерительной информации могут быть оптимально распределены между контроллерами 7 и 10. После окончания заправки контроллер 7 снимается с борта и остаётся у обслуживающего персонала для дальнейшего использования.

Предлагаемая система может быть использована на всех модификациях РН «Союз», так как контроллер может работать со всеми типами ДУЗ, а также учитывать ёмкость кабельной сети, что уменьшит погрешность измерения. При этом электронные блоки обработки вынесены за борт и пригодны для повторного использования, а отсутствие гальванической связи снимает вопросы с проверкой

наземной кабельной сети. Другие возможные способы и системы измерения уровня описаны в следующих источниках. [5-12]

Так как при столь глобальных доработках потребуется повторное прохождение метрологической экспертизы и проведение метрологической аттестации нового контроллера и нового датчика уровня заправки, рассмотрим погрешности измерения уровня компонентов топлива в баках ракет-носителей. Эти погрешности можно разделить на основные и дополнительные. Основные погрешности определяются внутренними свойствами устройства, эксплуатируемого в нормальных условиях в статическом режиме. Они подразделяются на методические, инструментальные, шумы. Важной составляющей основной погрешности, связанной с использованием криогенных топлив является его интенсивное испарение, поэтому на границе раздела сред имеет место быть полуагрегатное состояние среды, что приводит к неточности его границы.

Дополнительные погрешности определяются влияниями субъективных и внешних факторов, определяются точностью преобразования датчика уровня. Наибольшую долю вносят:

- несоответствие реального и расчетного значений диэлектрических проницаемостей жидкости и газа;
- отклонение температур окружающей среды при измерении сухой ёмкости датчика при его проверках на заводе-изготовителе и при настройке нуля в процессе подготовки системы к работе;

- погрешность определения коэффициента линейного расширения материала, из которого изготовлен датчик уровня;

- погрешность изготовления и установки датчика уровня;

- капиллярный эффект;

- электромагнитные помехи [13].

Устранение влияния субъективных факторов осуществляется при метрологической аттестации систем измерения уровня заправки и не рассматриваются в рамках данной статьи.

Наиболее существенный вклад в дополнительную погрешность вносит температурная погрешность. Она определяется зависимостью электрофизических свойств компонентов топлива, и геометрических размеров датчика уровня от температуры. Эту зависимость характеризует коэффициент μ_C , показывающий зависимость ёмкости при изменении температуры на 1 °С [14].

$$\mu_C = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial \theta} \left[\frac{1}{\text{град}} \right], \quad (7)$$

Этот коэффициент может принимать любое значение. В случае, если зависимость линейная, то коэффициент μ_C определяется:

$$\mu_C = \frac{C_2 - C_1}{C_1(\theta_2 - \theta_1)} \left[\frac{1}{\text{град}} \right], \quad (8)$$

Где C_1, C_2 – ёмкости при температурах θ_1, θ_2 соответственно.

Зависимость показаний датчика от температуры определяется зависимостью диэлектрической проницаемостью компонентов топлива и газов, а также конструкцией самого датчика – изменением его геометрических размеров.

Для рассматриваемого способа измерения уровня жидкости базовым является выражение для ёмкости конденсатора, образованного параллельными пластинами площадью S , расстояние d между которыми много меньше \sqrt{S} :

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad d \ll \sqrt{S} \quad (9)$$

Согласно (9) эта зависимость для плоского измерительного элемента квадратной формы с длиной стороны b получим:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{\varepsilon \cdot b^2}{d} \quad (10)$$

Дифференцируя выражение (10) по температуре, получаем:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \varepsilon_0 \left(\frac{b^2}{d} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} + \frac{\varepsilon}{d} \cdot 2 \cdot b \cdot \frac{\partial b}{\partial \theta} - \frac{\varepsilon \cdot b^2}{d^2} \frac{\partial d}{\partial \theta} \right). \quad (11)$$

Разделив выражения (11) на (10), получим:

$$\mu_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} + \frac{2}{b} \cdot \frac{\partial b}{\partial \theta} - \frac{1}{d} \cdot \frac{\partial d}{\partial \theta} = \mu_\varepsilon + 2\mu_\varepsilon - \mu_d. \quad (12)$$

где $\mu_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta}$ – коэффициент изменения геометрических размеров (металлов);

$\mu_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta}$ – коэффициент диэлектрической проницаемости среды;

$\mu_d = \frac{1}{d} \cdot \frac{\partial d}{\partial \theta}$ – коэффициент изменения зазора (органические диэлектрики).

Тогда ёмкость конденсатора при текущей температуре θ определится по формуле:

$$C_\theta = C_0 [1 + \mu_c (\theta - \theta_0)]. \quad (13)$$

C_0 – ёмкость конденсатора при нормальной температуре θ_0 (температуре калибровки, которая записывается в паспорт датчика).

В [15-19] достаточно полно раскрыта и изучена зависимость диэлектрической проницаемости газов от температуры. При изменении температуры от -40 до +70 °С и изменении влажности от 10 до 80 %, их диэлектрическая проницаемость составляет от 1,0005 до 1,0022.

Специалистов интересует, главным образом, абсолютная погрешность полной заправки бака, которая определится по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{пол} &= \frac{1}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \left[\frac{\Delta C_{пол}}{C_{сух}} - \frac{C_{пол} \Delta C_{сух}}{C_{сух}^2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ж}}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \right] = \frac{1}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \left[\frac{\Delta C_{пол}}{C_{сух}} - \frac{\varepsilon_{ж} C_{сух} \Delta C_{сух}}{C_{сух}^2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ж}}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \right] = \\ &= \frac{1}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \left[\frac{\varepsilon_{ж} \Delta C_{сух} + C_{сух} \Delta \varepsilon_{ж}}{C_{сух}} - \frac{\varepsilon_{ж} \Delta C_{сух}}{C_{сух}} + \frac{\Delta \varepsilon_{ж}}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \right] = \frac{1}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \left[\Delta \varepsilon_{ж} + \frac{\Delta \varepsilon_{ж}}{(\varepsilon_{ж} - 1)} \right] = \frac{\varepsilon_{ж}}{(\varepsilon_{ж} - 1)^2} \Delta \varepsilon_{ж}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{В (14) учтено, что } \Delta C_{пол} = \varepsilon_{ж} \Delta C_{сух} + C_{сух} \Delta \varepsilon_{ж}. \quad (15)$$

Из формулы (15) можно определить максимальный коэффициент изменения диэлектрической проницаемости: $\mu_{\varepsilon, \Gamma} = 0,18 \cdot 10^{-4} [1/град]$.

Ниже приведены температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости составных частей датчика уровня и контролируемых сред:

- органических и неорганических диэлектриков: $\mu_{\varepsilon} = (5 \div 10) \cdot 10^{-4} [1/град]$;
- металлов: $\mu_{\sigma} = (0,15 \div 0,30) \cdot 10^{-4} [1/град]$;
- неорганические диэлектрики, из которых изготавливают прокладки между электродами: $\mu_d = (0,05 \div 0,1) \cdot 10^{-4} [1/град]$;
- органические диэлектрики, из которых изготавливают прокладки между электродами: $\mu_d = (0,50 \div 1,0) \cdot 10^{-4} [1/град]$;

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости топлив [10-11]

$\mu_{\varepsilon, ж} = (1 \div 5) \cdot 10^{-3} [1/^\circ C]$, что значительно больше температурного коэффициента газов,

что следует из [20]. Рассмотрим изменение функции преобразования датчика уровня от температуры. Ёмкость идеального датчика с равными прямоугольными электродами определяется выражением:

$$\begin{aligned} C\left(\frac{h}{H}\right) &= C(\alpha) = \frac{\varepsilon_0 g H}{d} \left[\varepsilon_r + (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r) \frac{h}{H} \right] = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r g H}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r g H}{d} (\frac{\varepsilon_{ж}}{\varepsilon_r} - 1) \frac{h}{H} = \\ &= C_{сух} + C_{сух} (\frac{\varepsilon_{ж}}{\varepsilon_r} - 1) \frac{h}{H} \approx C_{сух} + C_{сух} (\varepsilon_{ж} - 1) \frac{h}{H} = \varepsilon_0 A [1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \alpha] = \\ &= \varepsilon_0 A [1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \alpha] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{где, } C_{сух} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r g H}{d} = A \varepsilon_0 \varepsilon_r, A = \frac{g H}{d}, \alpha = \frac{h}{H} \quad (17)$$

- ёмкость сухого датчика, конструкционный параметр и относительный уровень. Из (16) имеем:

$$C\left(\frac{h}{H}\right) = C(\alpha) = \frac{\varepsilon_0 g H}{d} \left[\varepsilon_r + (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r) \frac{h}{H} \right] = \varepsilon_0 A [\varepsilon_r + (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_r) \alpha] \approx \varepsilon_0 A [1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \alpha], \quad (18)$$

Таблица 1- Значения диэлектрической проницаемости ε топлив

Топливо	Диапазон значений ε при 20 °C	Средние ε при различных температурах			
		—60 °C	—20 °C	20 °C	60 °C
T-1	2,098...2,158	2,239	2,178	2,118	2,062
ТС-1	2,066...2,126	2,214	2,150	2,088	2,030
РТ	2,068...2,091	2,200	2,136	2,078	2,021
T-8	2,081...2,093	2,204	2,144	2,087	2,032
T-8В	2,071...2,116	2,217	2,156	2,098	2,042
T-6	2,122...2,144	2,247	2,189	2,134	2,083

По аналогии с (11) имеем:

$$\frac{\partial C(\alpha)}{\partial \theta} = \varepsilon_0 \left(\frac{\partial A}{\partial \theta} [1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \alpha] + A \left[\alpha \frac{\partial \varepsilon_{ж}}{\partial \theta} + \varepsilon_{ж} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} \right] \right). \quad (19)$$

Учитывая, что полный диапазон преобразования H , в связи с изменением длины электрода, также изменяется от температуры, для компонентов формулы (19)

можно записать:

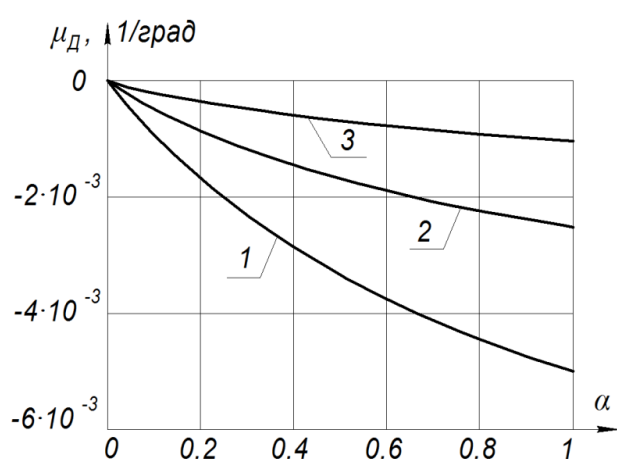
$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{gH}{d} \right) = \frac{\frac{\partial(gH)}{\partial \theta} d - gH \frac{\partial d}{\partial \theta}}{d^2} = \frac{\left(H \frac{\partial g}{\partial \theta} + g \frac{\partial H}{\partial \theta} \right) d - gH \frac{\partial d}{\partial \theta}}{d^2} = \frac{H \frac{\partial g}{\partial \theta}}{d} + \frac{g \frac{\partial H}{\partial \theta}}{d} - \frac{gH \frac{\partial d}{\partial \theta}}{d^2} = \\ &= \frac{Hg \frac{\partial g}{\partial \theta}}{d} + \frac{gH \frac{\partial H}{\partial \theta}}{d} - \frac{gH \frac{\partial d}{\partial \theta}}{d^2} = \frac{Hg}{d} (\mu_g + \mu_H - \mu_d) = \frac{Hg}{d} (2\mu_{\vartheta} - \mu_d) \end{aligned} \quad (20)$$

Последнее равенство получено на основе того, что $\mu_H = \mu_g = \mu_{\vartheta}$, так это температурный коэффициент расширения материала электрода

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta} = -h \frac{\partial H}{H^2 \partial \theta} = -\frac{h}{H} \mu_{\vartheta} = -\alpha \mu_{\vartheta}. \quad (21)$$

Разделив (19) на (18) получим температурный коэффициент ДУЗ в целом:

$$\begin{aligned} \mu_d &= \frac{\partial C(\alpha)}{C(\alpha) \partial \theta} = \frac{\partial A}{A \partial \theta} + \frac{\alpha \frac{\partial \varepsilon_{\text{ж}}}{\partial \theta} + \varepsilon_{\text{ж}} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \theta}}{[1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\alpha]} = \frac{\partial A}{A \partial \theta} + \frac{\alpha \varepsilon_{\text{ж}} \mu_{\varepsilon, \text{ж}} + \varepsilon_{\text{ж}} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \theta}}{[1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\alpha]} = \\ &= 2\mu_{\vartheta} - \mu_d + \frac{\alpha \varepsilon_{\text{ж}} \mu_{\varepsilon, \text{ж}} - \varepsilon_{\text{ж}} \alpha \mu_{\vartheta} + \alpha \mu_{\vartheta}}{[1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\alpha]} = 2\mu_{\vartheta} - \mu_d + \alpha \frac{\varepsilon_{\text{ж}} \mu_{\varepsilon, \text{ж}} - \mu_{\vartheta} (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)}{1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\alpha}. \end{aligned} \quad (22)$$



$$1 - \mu_{\vartheta} = 0,3 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_d = 1 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_{\varepsilon, \text{ж}} = -5 \cdot 10^{-3};$$

$$2 - \mu_{\vartheta} = 0,225 \cdot 10^{-4},$$

$$\mu_d = 0,5 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_{\varepsilon, \text{ж}} = -2,5 \cdot 10^{-3};$$

$$3 - \mu_{\vartheta} = 0,15 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_d = 0,1 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_{\varepsilon, \text{ж}} = -1 \cdot 10^{-3}.$$

Рисунок 5 – Зависимость температурного коэффициента датчика от уровня жидкости при различных значениях температурного расширения применяемых материалов

Диапазоны изменения указанных коэффициентов:

$\mu_{\varepsilon} = (0,15 \div 0,30) \cdot 10^{-4} [1/град]$, $\mu_d = (0,1 \div 1,0) \cdot 10^{-4} [1/град]$, $\mu_{\varepsilon,ж} = -(1 \div 5) \cdot 10^{-3} [1/град]$. На графике: 1 - максимальные, 2 - средние, 3 - минимальные значения температурных коэффициентов применяемых материалов. Ёмкость датчика при произвольной температуре определится по формуле:

$$C(\theta) = C(\theta_0)[1 + \mu_d(\theta - \theta_0)]. \quad (23)$$

Так как температурный коэффициент датчика отрицателен при всех значениях уровня жидкости, то с ростом температуры ёмкость датчика уменьшатся.

Температурный дрейф ёмкости связаны, в основном, с нестабильностью диэлектрической проницаемости топлива. Полученные результаты позволяют разработать методику компенсации температурной погрешности датчика по всему диапазону преобразования. Для абсолютного $\Delta C(\theta)$ и относительного $\gamma(\theta)$ изменения ёмкости от температуры можно записать:

$$\Delta C(\theta) = C_{\theta} - C_0 = C_0 \mu_d (\theta - \theta_0). \quad (24)$$

$$\gamma(\theta) = \frac{\Delta C(\theta)}{C_0} = \mu_d (\theta - \theta_0). \quad (25)$$

Учитывая, что в $C_0 = C(\theta_0, \alpha)$, где $a = \frac{h}{H}$ - текущее значение ёмкости при температуре калибровки, для абсолютной температурной погрешности измерения получим:

$$\begin{aligned} \Delta C(\theta, \alpha) &= C(\theta, \alpha) - C(\theta_0, \alpha) = C(\theta_0, \alpha) \mu_d (\theta - \theta_0) = \\ &= C(\theta_0, \alpha) \left[2\mu_{\varepsilon} - \mu_d + \alpha \frac{\varepsilon_{ж} \mu_{\varepsilon,ж} - \mu_{\varepsilon} (\varepsilon_{ж} - 1)}{1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \alpha} \right] (\theta - \theta_0) = \\ &= \varepsilon_0 A [\alpha (\varepsilon_{ж} \mu_{\varepsilon,ж} + \mu_{\varepsilon} \varepsilon_{ж} - \mu_{\varepsilon} - \mu_d \varepsilon_{ж} + \mu_d) + 2\mu_{\varepsilon} - \mu_d] (\theta - \theta_0) = K_{\theta, \alpha} (\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{где } K_{\theta,\alpha} = C_{\text{сух}} [\alpha(\varepsilon_{\text{ж}}\mu_{\varepsilon,\text{ж}} + \mu_{\text{э}}\varepsilon_{\text{ж}} - \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}\varepsilon_{\text{ж}} + \mu_{\text{д}}) + 2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}] \quad (27)$$

коэффициент температурного дрейфа датчика при текущем значении α уровня топлива. Здесь A , α , $\varepsilon_{\text{ж}}$ – значение параметров при температуре калибровки θ_0 .

$$\text{При } \alpha=0, \Delta C(\theta,0) = \Delta C_{\text{сух}}(\theta) = \varepsilon_0 A(2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}})(\theta - \theta_0) = K_{\theta,\text{сух}}(\theta - \theta_0), \quad (28)$$

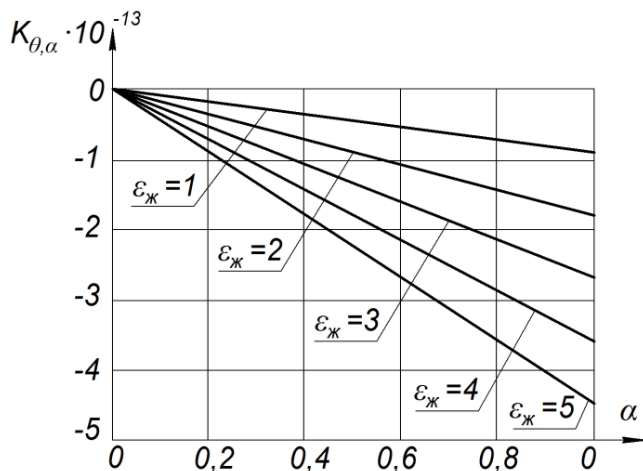
$$\text{где } K_{\theta,\text{сух}} = \varepsilon_0 A(2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}) = C_{\text{сух}}(2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}) - \quad (29)$$

коэффициент температурного дрейфа сухого датчика.

$$\begin{aligned} \text{При } \alpha=1 \quad \Delta C(\theta,1) &= \varepsilon_0 A[\varepsilon_{\text{ж}}\mu_{\varepsilon,\text{ж}} + \mu_{\text{э}}\varepsilon_{\text{ж}} - \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}\varepsilon_{\text{ж}} + \mu_{\text{д}} + 2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}](\theta - \theta_0) = \\ &= \varepsilon_0 A[\varepsilon_{\text{ж}}(\mu_{\varepsilon,\text{ж}} + \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}) + 2\mu_{\text{э}}](\theta - \theta_0) = K_{\theta,\text{пол}}(\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{где } K_{\theta,\text{пол}} = C_{\text{сух}}[\varepsilon_{\text{ж}}(\mu_{\varepsilon,\text{ж}} + \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}) + 2\mu_{\text{э}}] - \quad (31)$$

коэффициент температурного дрейфа заполненного датчика.



$$\begin{aligned} \mu_{\text{э}} &= 0,3 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_{\text{д}} = 1 \cdot 10^{-4}, \quad \mu_{\varepsilon,\text{ж}} = -5 \cdot 10^{-3}; \\ \varepsilon_{\text{ж}} &= 2,0; \quad \theta_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Рисунок 6 - Изменение температурного коэффициента датчика уровня при различных значениях параметров.

Подставляя в (25) выражение (22) для относительной температурной погрешности датчика уровня получим:

$$\gamma(\theta) = \mu_{\text{д}}(\theta - \theta_0) = [2\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}} + \alpha \frac{\varepsilon_{\text{ж}}\mu_{\varepsilon,\text{ж}} - \mu_{\text{э}}(\varepsilon_{\text{ж}} - 1)}{1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\alpha}](\theta - \theta_0). \quad (32)$$

Выражение (32) определяет относительную погрешность измерения при различных значениях температуры θ , уровня α , с учётом вида топлива ($\epsilon_{ж}$), материала электродов ($\mu_{э}$) и прокладок между ними ($\mu_{д}$).

Графики изменения абсолютной и относительной температурной погрешности при различных значениях уровня α показаны на рисунке 7. Оценим границы изменения ёмкости в рабочем диапазоне температур. Примем, что при температуре $\theta_0=20$ °C ёмкость заполненного датчика ($\alpha=1$) составляет $C_0=30$ пФ, тогда при температурах $\theta_1= -40$ °C и $\theta_2= +60$ °C и максимальном значении температурного коэффициента $\mu_{д} = -5 \cdot 10^{-3} [1/град]$, она будет иметь значения $C_1=39$ пФ, $C_2=24$ пФ соответственно.

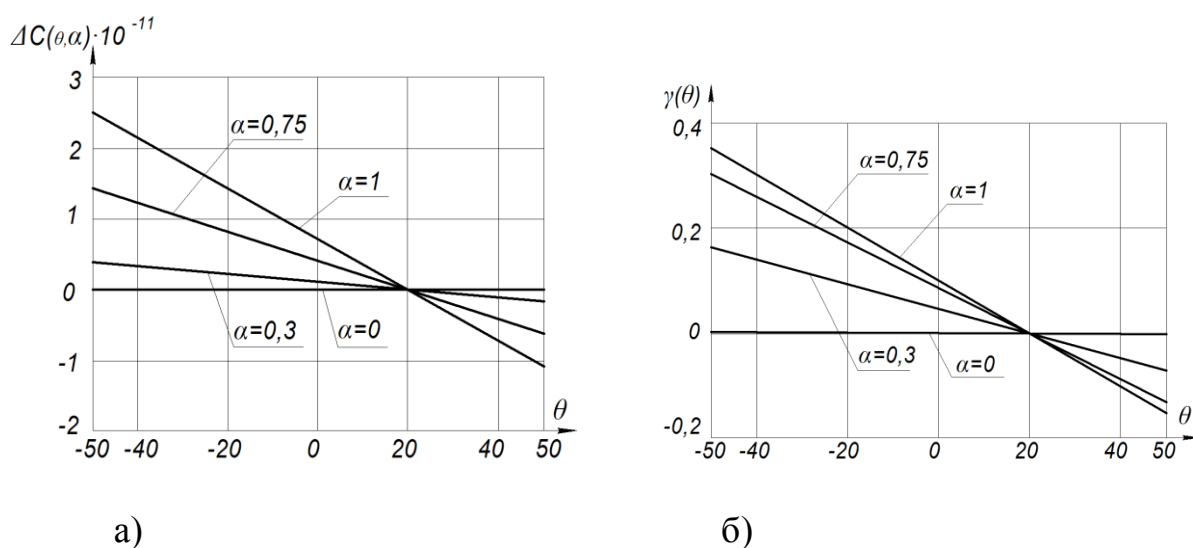


Рисунок 7 – Зависимость абсолютной и относительной погрешностей измерений от температуры при различном уровне топлива α .

Таким образом, при изменении температуры в диапазоне $-40 < \theta < 60$ град ($\Delta\theta=100$ град) ёмкость заполненного датчика изменяется на 15 пФ и составляет 50% от номинального значения. Это очень много и нужно учитывать при заправке. Отметим, что ёмкость сухого датчика ($\alpha=0$) меняется при этом в диапазоне 0,01%.

Столь малые изменения ёмкости сухого датчика объясняются тем, что температурные изменения размеров электродов компенсируются изменением зазора между ними. Указанные числовые оценки приведены для самого не благоприятного случая. Использование суммарного температурного коэффициента датчика уровня топлива позволяет проводить корректировку измерений на стадии обработки сигнала. Алгоритм такой корректировки включает в себя следующие процедуры.

В память микропроцессора вводятся и записываются следующие значения: температура, при которой проходила аттестационная калибровка датчика θ_0 , ёмкость сухого датчика $C_{сух}(\theta_0)$ и диэлектрическую проницаемость $\varepsilon(\theta_0)$ при температуре калибровки, справочные данные по температурным коэффициентам линейного расширения материала электродов и прокладок зазора μ_{ε} , μ_d , справочные данные по температурному изменению диэлектрической проницаемости компонента топлива $\mu_{\varepsilon,ж}$.

Кроме того, в ОЗУ микропроцессора непрерывно вводятся значения текущей температуры θ и текущей ёмкости датчика $C(\alpha, \theta)$. Все данные вводятся в виде цифровых кодов. Для вычисления истинного значения уровня α при текущей температуре микропроцессор выполняет следующие действия.

1. Определяет изменение ёмкости сухого датчика по формуле (28).
2. Вычисляет значение ёмкости сухого датчика при текущей температуре по формуле $C_{сух}(\theta) = C_{сух}(\theta_0) + \Delta C_{сух}$.
3. Определяет значение диэлектрической проницаемости топлива при текущей температуре по формуле $\varepsilon_{ж}(\theta) = \varepsilon_{ж}(\theta_0) + \mu_{\varepsilon,ж}(\theta - \theta_0)$.

4. Вычисляет значения уровня. В измерительной процедуре микропроцессор определяет текущую ёмкость датчика $C(\alpha) = C_\alpha$, затем относительный уровень α по формуле, вытекающей из (16).

$$\alpha = \frac{C(\alpha) - \varepsilon_0 A}{\varepsilon_0 A (\varepsilon_{Ж} - 1)} = \frac{C_\alpha - \varepsilon_0 A}{\varepsilon_0 A (\varepsilon_{Ж} - 1)} = \frac{C_\alpha - C_{сyx}}{C_{сyx} (\varepsilon_{Ж} - 1)}, \quad (33)$$

в которой составляющие определяются при текущей температуре θ .

$$\alpha = \frac{C(\alpha, \theta) - C_{сyx}(\theta)}{C_{сyx}(\theta) [\varepsilon_{Ж}(\theta) - 1]}, \quad (34)$$

где $C(\alpha, \theta)$ - текущее значение ёмкости в процедуре измерения.

Отметим, что истинное значение уровня при любой температуре определяется по формуле (33) только при текущих значениях её составляющих $C_{сyx}(\theta)$ и $\varepsilon_{Ж}(\theta)$.

Возьмём топливо Т1 (керосин). Пусть при $\theta = \theta_0 = 20^\circ \text{C}$; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 0.2$ м; $g = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $\varepsilon_{Г} = 1,0$; $\varepsilon_{Ж} = 2,118$; $A = 0,4$; $C_{сyx} = A \varepsilon_0 = 3,54 \cdot 10^{-12}$ Ф = 3,54 пФ.

$C_{пол} = \varepsilon_0 A \varepsilon_{Ж} = C_{сyx} \varepsilon_{Ж} = 3,54 \cdot 2,118 = 7,5$ пФ. Диапазон изменения ёмкости при $0 \leq \alpha \leq$

1 составляет $\Delta C(\theta_0) = C_{пол}(\theta_0) - C_{сyx}(\theta_0) = 7,5 - 3,54 = 3,96$ пФ.

Функция преобразования при температуре θ_0 в сигналах датчика будет иметь вид:

$$C(\alpha, \theta_0) = C_{сyx}(\theta_0) + \Delta C(\theta_0) \alpha \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{C(\alpha, \theta_0) - C_{сyx}(\theta_0)}{\Delta C(\theta_0)}. \quad (35)$$

Пусть, например, датчик в процессе измерения уровня α при нормальной температуре θ_0 приобрёл ёмкость $C(\alpha, \theta_0) = 6,0$ пФ. По формуле (33) вычисляем:

$$\alpha(\theta_0) = \frac{C(\alpha, \theta_0) - C_{сyx}(\theta_0)}{C_{сyx}(\theta_0) [\varepsilon_{Ж}(\theta_0) - 1]} = \frac{6 - 3,54}{3,54 \cdot 1,118} = \frac{2,46}{3,96} = 0,621$$

Тот же самый результат получаем по формуле (4.44):

$$\alpha = \frac{C(\alpha, \theta_0) - C_{\text{сух}}(\theta_0)}{\Delta C(\theta_0)} = \frac{6 - 3,54}{3,96} = \frac{2,46}{3,96} = 0,621$$

Пусть температура стала $\theta = -20$ °С. В этом случае, согласно таблице 1 $\varepsilon_{\text{ж}} = 2,178$. $\mu_{\varepsilon, \text{ж}} = \frac{\varepsilon_{20} - \varepsilon_{-20}}{\Delta\theta} = \frac{2,118 - 2,178}{40} = \frac{0,06}{40} = -1,5 \cdot 10^{-3}$ 1/град. Примем $\mu_{\varepsilon} = 0,3 \cdot 10^{-4}$, $\mu_d = 1 \cdot 10^{-4}$. Реальное значение ёмкости сухого датчика стало равным:

$$\alpha = 0, C_{\text{сух}}(\theta) = C_{\text{сух}}(\theta_0) + \Delta C_{\text{сух}}(\theta) = C_{\text{сух}}(\theta_0) + K_{\theta, \text{сух}}(\theta - \theta_0) = 3,54 + 1,42 \cdot 40 \cdot 10^{-4} \approx 3,534,$$

$$\text{где } K_{\theta, \text{сух}} = C_{\text{сух}}(2\mu_{\varepsilon} - \mu_d) = 3,54 \cdot (0,6 - 1) \cdot 10^{-4} = -1,416 \cdot 10^{-4}.$$

Ёмкость заполненного датчика при текущей температуре $C_{\text{пол}}(\theta) = C_{\text{сух}}(\theta)\varepsilon_{\text{ж}}(\theta) = 3,534 \cdot 2,178 = 7,7$ пФ. Функция преобразования при температуре θ_0 в сигналах датчика будет иметь вид:

$$C(\alpha, \theta) = C_{\text{сух}}(\theta) + \Delta C(\theta)\alpha \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{C(\alpha, \theta) - C_{\text{сух}}(\theta)}{\Delta C(\theta)}. \quad (36)$$

$$\Delta C(\theta) = C_{\text{пол}}(\theta) - C_{\text{сух}}(\theta) = 7,7 - 3,534 = 4,166.$$

При том же значении ёмкости $C(\alpha, \theta) = 6,0$ пФ, но при изменившихся от температуры параметрах фактический уровень будет равен:

$$\alpha(\theta) = \frac{C(\alpha, \theta) - C_{\text{сух}}(\theta)}{C_{\text{сух}}(\theta)[\varepsilon_{\text{ж}}(\theta) - 1]} = \frac{6 - 3,534}{3,534 \cdot 1,178} = \frac{2,466}{4,163} = 0,592$$

$$\text{Или по формуле (36)} \quad \alpha = \frac{C(\alpha, \theta) - C_{\text{сух}}(\theta)}{\Delta C(\theta)} = \frac{6 - 3,534}{4,166} = \frac{2,466}{4,166} = 0,592.$$

Это и есть истинное значение уровня при текущей температуре с точностью, определяемой рамками основной погрешности. Если бы мы проводили расчёт по формуле (33) без корректировки параметров, то абсолютная дополнительная погрешность при показании датчика 6,0 пФ составила бы:

$\Delta\alpha = \alpha(\theta) - \alpha(\theta_0) = 0,592 - 0,621 = -0,029$, что в единицах относительной приведённой погрешности составляет $\gamma_{II} = 2,9\%$.

Для заполненного ($\alpha=1$) при нормальной $\theta=\theta_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуре датчика ёмкость $C(1,\theta_0) = 7,5\text{ нФ}$ 7,5 пФ. При этом значении ёмкости $C(\alpha,\theta) = 7,5\text{ нФ}$, но при температуре $\theta = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ датчик показал бы $\alpha(\theta) = \frac{7,5 - 3,534}{3,534 \cdot 1,178} = \frac{3,966}{4,163} = 0,953$, что для приведённой погрешности составляет $\gamma_{II} = 4,7\%$. Таким образом, при определении заполненного состояния без температурной компенсации (при расчёте уровня по паспортным параметрам), но при изменении температуры от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ произошёл бы недолив топлива на 4,7% от объёма бака.

При отклонении температуры от калибровочного значения и проведении измерений без приёмов термокомпенсации возможен недолив топлива, при увеличении температуры – перелив топлива. Температурная компенсация показаний датчика уровня — это достаточно тонкая процедура, так как при изменении температуры меняются размеры бака и размеры датчика. При заправке специалистов интересует не столько объём топлива, сколько положение его зеркала относительно общей высоты бака в реальных условиях эксплуатации.

Разработанный алгоритм температурной компенсации не учитывает, что диэлектрическая проницаемость компонентов топлива и его паров нелинейно изменяется от температуры. Для учета этого нужно аппроксимировать температурную зависимость диэлектрической проницаемости аналитической

функцией, например полиномиальной $\varepsilon_{ж}(\theta) = \sum_{k=0}^n a_k \theta^k$ и использовать в выражении

(35). Для этого можно использовать экспериментальные данные таблицы 1.

В результате исследования дополнительных погрешностей, связанных с изменением температуры топлива и окружающей среды, получено аналитическое выражение, определяющее суммарный температурный коэффициент датчика уровня, связывающий температурные коэффициенты комплектующих материалов и контролируемых топлив. Показано, что в диапазоне температур $-40 < \theta < 60$ град ($\Delta\theta = 100$ град) ёмкость заполненного датчика изменяется на 50% от номинального значения, но ёмкость сухого датчика на 0,01%. Разработан алгоритм температурной компенсации показаний датчика.

Библиографический список

1. Гусейнов А.Б. Обоснование рационального уровня унификации и типажа систем снаряжения. // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28180>
2. Хуснетдинов И.Р. Анализ тенденций развития отечественных и зарубежных ракетносителей сверхтяжелого класса // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48480>
3. Скворцов Б.В., Захаров Р.С., Таипова Д.Р. Основные проблемы и направления развития систем контроля уровня топлив в баках ракет-носителей «Союз» // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. Т. 21 № 1. С. 114 - 121.

4. Скворцов Б.В., Захаров Р.С., Борминский С.А., Живоносная Д.М. Система измерения уровня заправки. Заявка на изобретение № 2019107035, 12.03.2019.
5. Лазарев А.В., Королев Р.А., Загвоздкин А.Я. Система измерения уровня заправки. Патент № 2414681 РФ. МПК G01F23/26. Бюлл. № 8, 20.03.2011.
6. Шевцов Н.С., Кожин В.Б. Измеритель уровня жидкости. Патент № 2150088 РФ. МПК G01F 23/26. Бюлл. №15, 27.05.2000.
7. Долгов Б.К., Балакин С.В. Способ определения уровня диэлектрического вещества. Патент № 2456552 РФ. МПК G01F23/26, G01R17/10. Бюлл. № 20, 20.07.2012.
8. Балакин С.В., Сербинов Д.Л. Способ определения параметров датчиков уровня заправки жидкостных ракет методом переменного тока // Труды МАИ. 2019. № 107.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107886>
9. Chetpattananondh K., Tapoanoi T., Phukpattaranont P., Jindapetch N. A self-calibration water level measurement using an inter digital capacitive sensor // Sensors and Actuators: A Physical, March 2014, vol. 209, pp. 175 - 182. DOI:[10.1016/j.sna.2014.01.040](https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.040)
- 10 Cihun-Siyong Alex Gong, Huan Ke Chiu, Li Ren Huang, Cheng Hsun Lin, Zen Dar Hsu, Po-Hsun Tu. Low-Cost Comb-Electrode Capacitive Sensing Device for Liquid-Level measurement // IEEE Journals, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 2896 – 2897.
11. Daniel Paczesny, Grzegorz Tarapata, Marzecki Michal, Ryszard Jachowicz. The Capacitance Sensor for Liquid Level measurement made with Ink-Jet Printing Technology // Eurosensors 2015, Freiburg, Germany, 6 - 9 September 2015.

12. Reverter Ferran, Li Xiujun, C M Gerard Meijer. Liquid-level Measurement System Based on a Remote Grounded Capacitive Sensor // Journal on Sensors and Actuators, 2007, vol. 138, pp. 1 - 8.
13. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Жегов Н.А., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49701>
14. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. – М.: Энергия, 1969. – 588 с.
15. Эпштейн С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. – Л.: Энергия, 1971. – 205 с.
16. Baxter L.K. Capacitive sensors: design and applications, IEEE Press Marketing, 1997, 302 p.
17. B. Fellmuth, H. Bothe, N. Haft, J. Melcher. High-precision capacitance bridge for dielectric-constant gas thermometry // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, vol. 60, no. 7, pp. 2522 - 2526.
18. Schmidt J.W., Moldover M.R. Dielectric permittivity of eight gases measured with cross capacitors // Journal of Thermophysical Properties and Thermophysics, 2003, vol. 24, no. 2, pp. 375 - 403.
- 19 Balakin S.V., Serbinov D.L. A method of determining the level of dielectric liquids from the parameters of a model of a capacitance fuel level sensor // Measurement Techniques, 2018, no. 10, pp. 998 – 1002.

20. Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. - М.: Химия, 1985. –

240 с.