

## **Способ определения параметров датчиков уровня заправки жидкостных ракет методом переменного тока**

**Балакин С.В.\*, Сербинов Д.Л.\*\***

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва,  
ул. Ленина, 4А, Королев, Московская область, 141070, Россия*

*\*e-mail: stanislav.balakin@rsce.ru*

*\*\*e-mail: dmitriy.rotax@gmail.com*

**Статья поступила 12.07.2019**

### **Аннотация**

В статье рассматриваются способы определения параметров емкостного датчика уровня, основанные на определении параметров его математической модели с помощью воздействия на него переменным током. Показана специфика технологического процесса определения параметров емкостного датчика уровня. Приведены существующие аналоги и раскрыты основные ограничения к их применению для решения задачи. Приведен вновь разработанный способ определения характеристик поплавково-индуктивных датчиков уровня жидкостных ракет. Рассмотрена модернизация способа за счет изменения вида сигнала возбуждения, направленная на увеличение точности. Представлены аналитические зависимости для определения параметров датчика, дана оценка погрешности определения его параметров. Приведены примеры реализации функционирования способа с помощью автоматизированного проектирования электронных схем, построенной на применении программируемых логических интегральных схем. Рассмотренный способ положен в основу создания аппаратуры нового поколения,

предназначенной для определения параметров датчиков уровня заправки ракеты в условиях технического и стартового комплексов.

**Ключевые слова:** датчик уровня заправки, определение, параметры двухполюсника, переменный ток, точность измерения, эффективность ракеты-носителя, диэлектрическая проницаемость, электрическая емкость.

### Введение

Методы определения параметров разнообразных объектов (физических, биологических и др.) основанные на суждении об объекте измерения по его математической модели и связанные с анализом прохождения через эти объекты переменного тока, получают все большее распространение. Быстро развиваются и необходимые для этого средства измерения (СИ) параметров цепей переменного тока: функционально ориентированные приборы для измерения таких параметров при решении широкого круга общих задач в различных областях науки и техники (измерители и анализаторы импеданса, анализаторы частотных характеристик, и т.д.) и проблемно-ориентированные системы для исследования лишь определенных групп объектов, например, электрохимических процессов, процесса роста микроорганизмов, полупроводниковых материалов и т.д., путем измерения параметров схем замещения (моделей) таких объектов измерения [1].

В частности, методы, основанные на суждении об объекте измерения по его математической модели, находят широкое распространение в ракетно-космической

технике. Как известно, одним из ключевых параметров эффективности ракеты-носителя (РН) космического назначения является масса полезной нагрузки, выводимая на орбиту. При этом основными путями увеличения массы полезной нагрузки являются увеличение удельного импульса тяги двигателей [2] и уменьшения массы РН, в том числе уменьшения массы гарантийных запасов топлива в баках. В технической литературе гарантийные запасы топлива определены как дополнительные запасы компонентов рабочего топлива в ракетных блоках ступеней ракеты космического назначения, предназначенные для компенсации возмущающих факторов, при этом одним из возмущающих факторов является погрешность измерения уровня топлива при заправке на стартовом комплексе [3, 4]. Соответственно одним из путей повышения эффективности РН является увеличение точности измерения уровня заправляемого в баки топлива.

Кроме того, еще одной актуальной задачей является определение параметров датчиков уровня заправки (ДУЗ) на техническом комплексе в ходе проверки РН или разгонного блока (РБ) до их вывоза на стартовый комплекс. Эта процедура необходима для контроля соответствия параметров ДУЗ и бортовой кабельной сети паспортным значениям. В ракетно-космической отрасли для решения задачи определения параметров ДУЗ жидкостных РН и РБ в условиях технического комплекса (длина кабельной линии связи до ДУЗ около 150 метров) использовался «мост переменного тока» ЦЕ 5002, производителем которого является Украина, и который в настоящий момент снят с производства.

Таким образом, актуальность проводимых исследований по разработке способа определения параметров ДУЗ путем воздействия переменным током, обусловлена тем, что требование по обеспечению высокой точности определения параметров ДУЗ и соответственно измерения уровня заправки дозируемой массы топлива, направлено на снижение массы гарантийных запасов топлива жидкостной ракеты и как следствие повышение её эффективности. Кроме того, актуальность проводимых исследований обусловлена также необходимостью создания средств измерения параметров ДУЗ в условиях технического комплекса.

### **Проблема измерения топлива в баках РКН**

Компонентами ракетного топлива являются диэлектрические жидкости и криогенные сжиженные газы, такие как жидкий кислород и жидкий водород [5, 6], достигающие температур кипения около  $-253$  °С. Очевидно, что для таких температур выбор метода измерения сильно ограничен. Большое распространение в изделиях РКТ получил емкостной метод измерения, основанный на разности диэлектрической проницаемости топлива и газовой среды, заполняющих непрерывный датчик уровня заправки (ДУЗ) благодаря ряду достоинств, таких как возможность работы в кипящем компоненте, линейность характеристики, отсутствие подвижных частей и пр. ДУЗ представляет собой воздушный цилиндрический конденсатор в дублированном исполнении в соответствие с рис. 1.

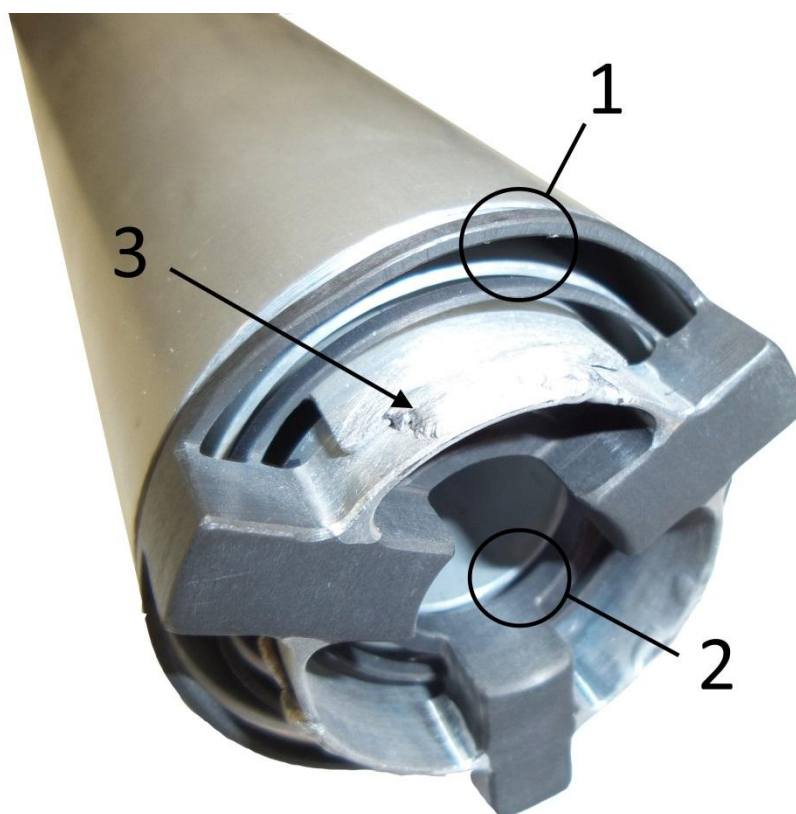


Рис. 1 ДУЗ, вид с торца, где:

- 1 – основные измерительные электроды;
- 2 – дублирующие измерительные электроды;
- 3 – защитный экранный электрод.

Процесс измерения уровня в баке жидкостной ракеты представлен в литературе [7]. Емкостному датчику уровня заправки соответствует схема замещения, выполненная в виде параллельно соединенных емкости  $C_p$  и резистора  $R_{\text{диэл}}$ , где:  $C_p$  - рабочая электрическая емкость ДУЗ, которая несет полезную информацию об уровне заправки бака. Значение электрической емкости при заправке бака изменяется за счет разных значений диэлектрических проницаемостей газовой подушки бака и топлива, заполняющего ДУЗ;  $R_{\text{диэл}}$  – сопротивление тока утечки через диэлектрическое топливо.

Упрощенная формула для определения уровня топлива при использовании непрерывного емкостного датчика будет следующей:

$$n(\%) = \frac{h}{H} 100\% = \frac{C_D - C_{CVX} \varepsilon_G}{C_{CVX} (\varepsilon_J - \varepsilon_G)} 100\% \quad (1),$$

Где  $\frac{h}{H}$  - процент (%) заполнения датчика топливом в баке,  $H$  - рабочая высота

датчика,  $h$  - высота заполненной топливом части датчика;

$C_D$  - измеренное значение электрической емкости датчика;

$C_{CVX}$  - значение электрической емкости незаполненного датчика;

$\varepsilon_G$  - значение диэлектрической проницаемости газовой среды, заполняющей датчик;

$\varepsilon_J$  - значение диэлектрической проницаемости заправляемого топлива.

Вышеуказанные значения имеют определенную погрешность, вызванную отклонением их от действительного значения, при этом теоретически и экспериментально установлено, что наибольшей погрешностью является относительная погрешность измерения электрической емкости датчика, составляющая в современных измерительных системах от  $\pm 0,5\%$  до  $\pm 1\%$ .

### **Обзор современных способов измерения**

В институте проблем управления (ИПУ) им. В.А. Трапезникова РАН разработан универсальный базовый вариант измерителя анализатора параметров импеданса, на основании которого возможно построение как функционально, так и проблемно-ориентированных приборов, предназначенных для проведения исследований свойств твердых тел, тонкопленочных структур, изучения

кислорододефицитных криолитов, сегнетоэлектрических явлений, ионной и суперионной проводимости и т.д. [8].

При создании преобразователя разработчики ИПУ РАН добивались невысокой стоимости, максимальной простоты и небольших габаритов. При этом прибор должен обеспечивать достаточно высокие метрологические характеристики, а также иметь гибкие функциональные возможности за счет оптимальной организации алгоритмов функционирования и эффективной обработке измерительной информации на ПЭВМ в совокупности с методами цифровой фильтрации и тестирования [9, 10].

В данном преобразователе, чтобы получить измерительную информацию, необходимую при вычислении параметров импеданса, циклически по сигналам, формируемым ПЭВМ, производится подключение фазочувствительного детектора (ФЧД) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сначала к объекту измерения, затем к мере с соответствующими переключения фазы опорного напряжения с дискретностью  $\Delta\psi = \frac{\pi}{2 \cdot n}$ , где  $n$ - целое число. В результате после каждого измерительного цикла на выходе АЦП получается значение  $U_{ij}$  ( $i=1,2; j=1..n$ ) – проекция вектора измеряемого напряжения на вектор опорного напряжения:

$$U_{i\zeta} = \int_0^T U_i(t)G_\zeta(t)dt \quad (2),$$

где  $T$ - интервал интегрирования;  $U_{ij}(t)$  - входной сигнал ФЧД;  $G_j(t)$  - опорный сигнал [10].

Коды, несущие информацию об  $U_{ij}(t)$ , поступают в ПЭВМ, где после статистической обработки, если это требуется, они подвергаются обработке по

алгоритму, обеспечивающему вычисление действительной и мнимой составляющих напряжений на объекте измерений и на мере.

Что касается точности измерения, то на неё в данном случае оказывают влияние только аддитивные погрешности ФЧД и АЦП, но они достаточно малы. Поэтому основным источником погрешности измерения в преобразователе являются мультипликативные погрешности измерительной цепи, которые в значительной степени можно устранить калибровкой преобразователя по внешней образцовой мере [11].

На принципе построения адекватной модели объекта исследования, в частности ДУЗ, в ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева разработан и запатентован «Способ определения параметров двухполюсников» № 2260809, опубликованный 20.09.2005 в бюллетене № 26 [12]. В основу функционирования изобретения положен способ косвенного измерения параметров при формировании напряжения синусоидального воздействия на объект измерения, нашедший применение благодаря инвариантности по отношению к характеру объекта измерения и его схеме замещения. [13].

При создании изобретения авторы учли специфику технологического процесса определения параметров емкостного ДУЗ. Обозначим наиболее характерные условия определения параметров:

- 1) удаленность до 500 метров емкостного ДУЗ от средства измерения.

Примером тому может служить процесс определения параметров емкостного ДУЗ, вмонтированного в бак ракеты, которая находится на техническом комплексе во



время испытаний ракеты или на стартовом комплексе во время её заправки. При этом указанные условия удаленности от объекта исследования накладывают ограничения на процесс определения параметров ДУЗ, а именно, ограничивают диапазон рабочих частот. Например, при рабочей частоте переменного тока свыше 10 кГц возникают существенные искажения сигнала за счет влияния характеристик длиной кабельной линии связи. Поэтому верхний предел границы частотного диапазона не должен превышать 10 кГц. Кроме того на бортовую кабельную линию могут наводиться электромагнитные помехи от бортовой радиоэлектронной аппаратуры РН [14].

2) электропроводная связь с объектом исследования (ДУЗ) должна быть двухпроводной. Данное требование является вполне очевидным, так как оно обусловлено минимизацией веса бортовой кабельной сети и снижением количества электрических контактов между ракетой и наземными системами подготовки и пуска ракеты.

В связи со снятием с производства моста переменного тока ЦЕ5002 разработчики датчиков уровня и соответственно уровнемерных систем жидкостных ракет стали перед выбором: поиск других, работоспособных в условиях технического комплекса, приборов; проведение исследований с целью создания новых методов определения параметров ДУЗ.

Первый путь решения проблемы к успеху не привел – не удалось найти прибор переменного тока, работоспособный в условиях технического комплекса, включая импортные. При этом созданный в ИПУ РАН прибор имеет диапазон

рабочих частот от 10 до  $10^5$  Гц, что позволяет ему обеспечить измерение параметров многоэлементного двухполюсника [15], которым является ДУЗ, с высокой точностью, но в условиях, оговоренных в статье [10]. Кроме того основным ограничением при его применении является наличие длинной двухпроводной кабельной линии связи, достигающей длины 500м. При такой длине распределенные паразитные составляющие линии связи, которыми являются электрическое сопротивление, емкость и индуктивность накладывают определенные ограничения при выборе способа измерения, в том числе фазовые измерения в таких условиях чрезвычайно сложно реализовать.

Поэтому авторы пошли путем, направленным на разработку нового способа определения параметров ДУЗ в условиях технического комплекса. При этом авторами был использован теоретический и экспериментальный задел, полученный при разработке способа измерения уровня при заправке ракеты на стартовом комплексе.

### **Решение поставленной задачи**

Электрическая емкость сухого ДУЗ составляет, как правило, 500 *nF*. Активная составляющая сопротивления емкостного ДУЗ  $R_{дизэл}$  определяется состоянием сопротивления изоляции кабельной линии связи, влажностью в баке, а также сортностью керосина, которому свойственны токи утечки через диэлектрик. Значение активной составляющей может находиться в эксплуатационных пределах от 200 *кОм* до 5 *МОм*. Поэтому учет этой составляющей при определении

сопротивления двухполюсника имеет принципиальное значение для точности измерения уровня заправки [12].

Так как согласно схеме замещения ДУЗ является двухэлементным двухполюсником, то определение его параметров заключается в воздействии переменным током на двух заданных частотах, сначала на ДУЗ, затем на эталон. После чего последовательно производят измерение значений токов через ДУЗ и эталон на каждой из двух заданных частотах, и результаты измерений запоминают в вычислительном устройстве. Используя измеренные результаты токов, вычисляют значения параметров ДУЗ.

Согласно заданной схеме замещения ДУЗ имеем следующие выражения для определения его параметров [12]:

$$C_p = \frac{1}{R_{ЭТ}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{\omega_1}}{I_{ЭТ}}\right)^2 - \left(\frac{I_{\omega_2}}{I_{ЭТ}}\right)^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}}; \quad (3)$$

$$R_{ДИЭЛ} = R_{ЭТ} \cdot \sqrt{\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\left(\frac{I_{\omega_2}}{I_{ЭТ}}\right)^2 \cdot \omega_1^2 - \left(\frac{I_{\omega_1}}{I_{ЭТ}}\right)^2 \cdot \omega_2^2}} \quad (4),$$

где  $C_p$  – рабочая электрическая емкость ДУЗ;

$R_{ДИЭЛ}$  – сопротивление тока утечки через диэлектрическое топливо;

$R_{ЭТ}$  – сопротивление эталона;

$\omega_1, \omega_2$  – частоты переменного тока, на которых осуществляют воздействие на ДУЗ и эталон;

$I_{\omega_1}, I_{\omega_2}, I_{\omega_1}^{\text{ЭГ}}, I_{\omega_2}^{\text{ЭГ}}$  - измеренные значения токов через ДУЗ и эталон соответственно на заданных частотах.

Однако по результатам эксплуатации на технических и стартовых комплексах космодромов оборудования для определения параметров ДУЗ, в котором использованы выше представленные зависимости (3) и (4), установлено:

- на результат измерения влияют токи, наводимые на длинной линии связи от внешних источников. Подавить такие токи смещения, с помощью аналоговых и цифровых фильтров является не простой задачей;

- на результат измерения влияет значение разности частот переменного тока, на которых осуществляют воздействие на ДУЗ. Причем, экспериментально установлено, что чем больше разнесены частоты переменного тока, тем выше точность измерения параметров двухполюсника. Поэтому способ определения параметров двухполюсника, представленный в литературе [8], в данной статье получил дальнейшее развитие.

В данном случае воздействовать на ДУЗ следует переменным током на одной частоте, например  $\omega_1$ , а вместо воздействия переменным током на частоте  $\omega_2$ , воздействовать на ДУЗ постоянным током, частный случай переменного тока с частотой равной нулю.

В связи со сказанным выше, целью способа определения параметров ДУЗ, получившего развитие в данной статье, является повышение точности определения его параметров. Это повышение точности достигается путем определения его параметров с учетом токов смещения, наводимых на длинной линии связи, а также

путём осуществления одного измерения на переменном токе, а затем осуществления второго измерения на постоянном токе. Причем, анализ показывает, что создаваемые на основе предлагаемого способа средства измерения при сохранении высоких метрологических качеств одновременно упрощаются в схмотехническом исполнении.

Для определения параметров ДУЗ осуществляют следующую последовательность действий:

- осуществляют воздействие на ДУЗ и эталон переменным током на одной заданной частоте, после чего формируют воздействие на ДУЗ и эталон напряжением постоянного тока;

- последовательно производят измерение токов через ДУЗ и эталон на заданной частоте и постоянном токе;

- снимают воздействия напряжениями и проводят измерение токов смещения через ДУЗ и эталон, результаты всех измерений фиксируют;

- определяют разность токов, измеренных при воздействии переменным током на ДУЗ и эталон, и токов смещения, полученные результаты фиксируют;

- определяют параметры ДУЗ, используя схему замещения.

Приравняв частоту  $\omega_2$  в выражениях (3), (4) к нулю получим следующие аналитические выражения для определения параметров ДУЗ:

$$C_p = \frac{1}{R_{ЭТ}\omega_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{\omega 1}}{\Delta I_{\omega 1}^{ЭТ}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta I_0}{\Delta I_0^{ЭТ}}\right)^2}; \quad (5)$$

$$R_{ДМЭЛ} = R_{ЭТ} \cdot \frac{\Delta I_0^{ЭТ}}{\Delta I_0}. \quad (6),$$

где знак  $\Delta$  указывает на компенсацию токов смещения, которые были измерены при выключенных источниках переменного и постоянного тока.

Таким образом, использование постоянного тока, для воздействия на ДУЗ и эталон, вместо синусоидального тока заданной частоты, позволяет добиться максимальной разности между измерительными частотами токов и соответственно повысить точность измерения его параметров. При этом измерение тока смещения, наводимого на длинной линии связи, и вычитание его из токов, измеренных по результатам воздействия переменным током на ДУЗ и эталон, позволяет исключить влияние тока смещения на результат измерения и, тем самым повысить точность определения параметров ДУЗ.

Вновь разработанный способ авторами применен при создании аппаратуры измерения параметров цепей ДУЗ, который используется при подготовке РН «Союз-СТ» в части контроля параметров нескольких измерительных каналов емкостных ДУЗ на техническом комплексе космодрома Куру во Французской Гвиане. Контроль параметров емкостных ДУЗ осуществляется в автоматическом режиме с регистрацией результатом измерений.

Пределы основной относительной погрешности измерений электрической емкости при температуре от 5 до 40 °С составляют не более  $\pm 0,4\%$ . Диапазон измеряемой электрической емкости измерительным каналом составляет от 100 до 2000 пФ.

В качестве другого примера использования разработанного способа для определения параметров пассивного двухполюсника рассмотрим пример его

применения для определения параметров поплавкового-индуктивного датчика уровня заправки. Принцип действия поплавкового-индуктивного ДУЗ основан на использовании существенной разницы плотностей жидкой и газообразной фазы ракетного топлива.

Схема замещения поплавкового-индуктивного ДУЗ соответствует резистору и индуктивности, которые соединены последовательно. Так как поплавкового-индуктивный ДУЗ двухэлементный, то в соответствии с изобретениями [12, 16] необходимо осуществлять воздействие на ДУЗ переменным током на двух частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В этом случае справедливы следующие соотношения, выражающие параметры ДУЗ:

$$L = R_{ЭГ} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{\omega 1}^{ЭГ}}{I_{\omega 1}}\right)^2 - \left(\frac{I_{\omega 2}^{ЭГ}}{I_{\omega 2}}\right)^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}}; \quad (7)$$

$$R = R_{ЭГ} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{\omega 2}^{ЭГ}}{I_{\omega 2}}\right)^2 \cdot \omega_1^2 - \left(\frac{I_{\omega 1}^{ЭГ}}{I_{\omega 1}}\right)^2 \cdot \omega_2^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}}. \quad (8)$$

Датчик уровня заправки, параметры которого нужно определить, подключен к средству измерения через длинную линию. В этом случае в соответствии с вновь разработанным способом определения параметров на ДУЗ воздействуют переменным током частоты  $\omega_1$  и постоянным током.

В результате преобразований имеем следующие выражения для определения параметров ДУЗ:

$$L = R_{\text{ЭТ}} \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta I_{\omega 1}^{\text{ЭТ}}}{\Delta I_{\omega 1}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta I_0^{\text{ЭТ}}}{\Delta I_0}\right)^2}{\omega_1^2}}; \quad (9)$$

$$R = R_{\text{ЭТ}} \cdot \frac{\Delta I_0^{\text{ЭТ}}}{\Delta I_0}. \quad (10)$$

В качестве средства измерения, как вариант, может быть использовано устройство, включающее генератор переменного напряжения, управляемый по частоте, источник постоянного тока и ключ, обеспечивающий последовательную подачу как переменного, так и постоянного напряжения, а также снятие напряжения. Кроме того, устройство включает преобразователь ток-напряжение последовательно соединенный с масштабирующим усилителем, аналогово-цифровым преобразователем. Последний соединен с вычислительным устройством, которое фиксирует результаты измерений токов через ДУЗ и эталон и в соответствии с выражениями (3), (4) и (7), (8) определяет параметры ДУЗ. При необходимости могут быть определены тангенс угла сдвига между током и напряжением, то есть могут быть определены все параметры ДУЗ, как пассивного двухполюсника [16].

Для практической реализации вновь разработанного способа использована технология автоматизированного проектирования электронных схем, построенная на применении программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) разработки фирмы Xilinx [17,18]. На базе ПЛИС построены не только блоки обработки измерительной информации, вычисления аналитических зависимостей и алгоритмы управления заправкой, но и функциональные блоки аналогового тракта



измерений, которыми являются аналого-цифровой преобразователь интегрирующего типа, генератор синусоидального напряжения, схема управления по частоте и масштабу усиления. Подход с использованием ПЛИС позволяет минимизировать оборудование устройства управления цифровым вычислительным устройством с целью сокращения числа логических элементов в управляющем автомате. [19].

### **Выводы**

Разработанный способ измерений позволил создать устройство для обеспечения измерений параметров ДУЗ на техническом комплексе взамен снятого с производства моста переменного тока ЦЕ5002

Также, проведенные исследования, направленные на разработку способа определения параметров ДУЗ путем воздействия на него переменным током направлены на увеличение точности измерения, с помощью чего возможно уменьшение массы гарантийных запасов топлива РН или РБ и соответственно повышение её эффективности. В качестве одного из направлений применения разработанных методов можно обозначить модернизацию устаревших систем измерения с относительно невысокой точностью, например системы контроля уровня заправки РБ ДМ-SLB комплекса «Морской старт» [20].

Описанный в статье способ может быть использован для измерения электрических параметров двухполюсников, используемых в качестве датчиков физических процессов (температуры, давления, уровня жидких и сыпучих сред и

др.) на промышленных объектах, транспортных средствах, а главное, в системах измерения уровня заправки жидкостных РН в ракетно-космической технике.

### **Библиографический список**

1. Кнеллер В.Ю. Состояние и тенденции развития средств автоматического измерения параметров цепей переменного тока // Измерение. Контроль. Автоматизация. 1993. № 1 - 2. С. 13 - 22.
2. Аверьков И.С., Демская И.А., Катков Р.Э. и др. Анализ энергетических возможностей составных углеводородных горючих для кислородных двигателей космических ракетных ступеней // Космическая техника и технологии. 2017. № 4. С. 46 - 51.
3. Гаврелюк О.П., Кирсанов В.Г. Гарантийные запасы топлива для ракет космического назначения // Космическая техника и технологии. 2015. № 3. С. 100 - 106.
4. Партола И.С. Развитие средств математического моделирования двигательных установок ракет космического назначения // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26017>
5. Хуснетдинов И.Р. Анализ тенденций развития отечественных и зарубежных ракетносителей сверхтяжелого класса // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48480>

6. Галеев А.В. Оптимизация схем и режимов заправки вытеснительной системы подачи компонентов ракетного топлива для испытаний камеры сгорания ЖРД // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67814>
7. Балакин С.В., Долгов Б.К., Филин Б.К. Опыт эксплуатации систем контроля заправки жидкостных ракет как основа создания системы нового поколения // Датчики и системы. 2005. № 7. С. 10 - 17.
8. Сапронов П.В. Области применения средств измерений параметров цепей переменного тока и измеряемые с их помощью объекты // Вестник Тамбовского государственного университета. 2006. Т. 11. № 4. С. 575 - 578.
9. Бобылев Д.А. Подход к цифровой обработке сигналов в помехоустойчивых измерителях-анализаторах импеданса // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 49 – 53.
10. Агамалов Ю.Р., Бобылев Д.А., Кнеллер В.Ю. Измеритель-анализатор параметров комплексных сопротивлений на основе персональной ЭВМ // Измерительная техника. 1996. № 6. С. 56 - 60.
11. Yu. Agamalov, D. Bobyljev, V. Kneller. Low-frequency pc-based impedance meter with high resolution. IMEKO TC-4 // Symposium on Digital Measuring Instrumentation and 3<sup>rd</sup> Workshop on ADC Modelling and Testing, September 17-18, 1998, Maples, Italy.
12. Долгов Б.К., Балакин С.В. Способ определения параметров двухполюсников. Патент РФ № 2260809. Бюлл. № 26, 20.09.2005.

13. Балакин С.В., Сербинов Д.Л. Способ определения уровня диэлектрических жидкостей по значениям параметров модели емкостного датчика уровня // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 21 – 24.

14. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Жегов Н.А. и др. Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49701>

15. Бобылев Д.А., Боровских Л.П. Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников // Измерительная техника. 2014. № 12. С. 47 - 51.

16. Балакин С.В., Сербинов Д.Л., Сидоров С.В. и др. Устройство определения параметров двухполюсников. Патент РФ № 2499232. Бюлл. № 32, 20.11.2013.

17. Тарасов И. ПЛИС Xilinx и цифровая обработка сигналов. Особенности, преимущества, перспективы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. №3. С. 70 – 74.

18. Матафонов Д.Е. Создание и отработка маршрутизатора в стандарте SpaceWire на отечественной программируемой логической интегральной схеме // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100780>

19. Хмара С.А., Назаров А.В. Минимизация оборудования устройства управления цифровым вычислительным устройством // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=27752&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=27752&PAGEN_2=2)

20. Алиев В.Г., Легостаев В.П., Лопота В.А. Создание и пятнадцатилетний опыт эксплуатации ракетно-космической системы «Морской старт» // Космическая техника и технологии. 2014. № 2. С. 3 – 13.