

MATHEMATICAL BASICS OF A FUEL GAUGE DESIGN

Kupriyanov G. A., SUAI post-graduate

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПЛИВОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Куприянов Г. А., ГУАП

Тел. +7(812)903-88-01, e-mail: jorge@list.ru,

Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
кафедра компьютерных систем автоматизации

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67

Тел.+7 (812) 315-49-67, e-mail: sol_k14@aanet.ru

ABSTRACT. Here are fuel gauge system structures and mathematical model presented and described. The formulae for fuel gauge error in a general case are derived. Also linear fuel probe mathematical model is shown. This article is illustrated with a fuel tank calibration curve set screen shot and fuel gauge CAD-software user interface screen shot.

Рассмотрим ТИС как объект проектирования и начнём с определения понятий. Топливоизмерительная система (ТИС, топливомер) – измерительный прибор, который предназначен для точного определения в реальном времени количества топлива, находящегося в топливных резервуарах. ТИС применяются главным образом в транспортных средствах, большей частью в авиационном и автомобильном транспорте. Также ТИС применяют в железнодорожном и водном транспорте. В зависимости от вида транспорта сложность ТИС может меняться. Наиболее сложными являются ТИС для летательных аппаратов (ЛА) – самолётов и вертолётов.

Как и всякий измерительный прибор, ТИС имеет в своём составе датчики, устройство обработки измерительной информации, снимаемой с датчиков, и устройство индикации измеряемой величины. В случае ТИС измеряемой величиной является в большинстве случаев либо масса топлива, или, что бывает реже, объём топлива в резервуаре. В дальнейшем сосредоточим своё внимание на рассмотрении авиационной ТИС. На рис.1 представлена обобщённая её структура, отражающая передачу потоков измерительной информации (показаны стрелками).

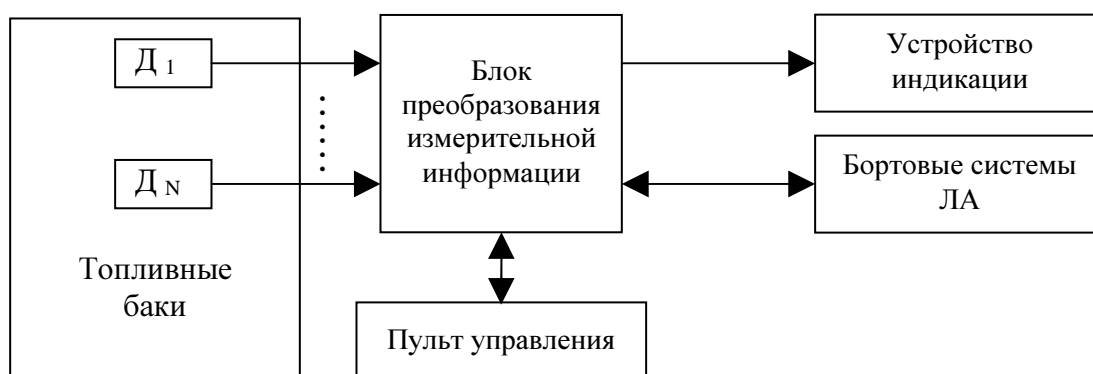


Рис. 1. Обобщённая структура ТИС. Датчики обозначены как $D_1 \dots D_N$

В данной схеме стрелкам физически соответствуют кабели, по которым передаётся измерительная и управляющая информация. Устройство индикации и пульт управления могут отсутствовать, если предполагается, что их функции возьмут на себя соответствующие устройства других бортовых систем. В дальнейшем изложении мы не будем их рассматривать с точки зрения математики и ПО. Здесь и далее топливные резервуары суть топливные баки ЛА.

Количество топлива в баке зависит от уровня, т.е. от расстояния, на котором находится свободная поверхность топлива (СПТ) от нижней точки внутренней поверхности бака. Уровень топлива отсчитывается вдоль оси, совпадающей с нормалью к СПТ, которая в установившемся режиме является плоской. Поэтому в ТИС ЛА косвенно измеряется уровень топлива, преобразуемый в его объём по функции, носящей название “тарировочная характеристика бака” (ТХ; её ещё называют градуировочной или калибровочной характеристикой). Иными словами, ТИС является уровнемером [1], в который ещё введены дополнительные функции.

Наибольшее распространение получили ТИС, в которых получение уровня топлива основано на измерении электрической ёмкости погруженных в топливо датчиков, представляющих собой коаксиально-цилиндрические конденсаторы. Существуют датчики и других типов, применяемые реже – ультразвуковые (достаточно перспективные), и поплавковые (устаревшие).

Сконцентрируем внимание на ТИС с электроёмкостными датчиками.

Построим сначала модель преобразования информации в среде (бак с топливом и воздухом) с помещёнными в неё датчиками, рассматривая массу, объём и уровень топлива, а также и электроёмкости датчиков, как систему взаимозависимых величин (рис.2).

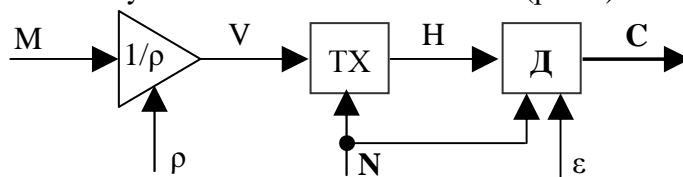


Рис. 2. Модель преобразования информации в баке с топливом и с помещёнными в него датчиками ТИС (Д).

Здесь M , V , H – соответственно масса, объём и уровень топлива в баке.

Данной структуре соответствует функция преобразования физических величин – свойств топлива (массы M , плотности ρ и диэлектрической проницаемости (ДП) ϵ) и задаваемого нормалью N положения СПТ – в электроёмкости датчиков C :

$$\vec{C} = \mathbf{F}(M, \rho, \epsilon, \vec{N}) = C_\epsilon(H) = C_\epsilon(TX_{\vec{N}}(V)) = C_\epsilon(TX_{\vec{N}}(M\rho^{-1})). \quad (1)$$

Назовём её функцией среды. Тогда функцией ТИС будет в общем случае обратная зависимость

$$M^* = G^*(\vec{C}, \rho^*, \epsilon^*, \vec{N}^*), \quad (2)$$

которая ставит в соответствие электроёмкости датчиков и косвенно измеренным, указанным выше физическим величинам массу топлива (показание топливомера) с ошибкой

$$\delta = M^* - M = G^*(\mathbf{F}(M, \rho, \epsilon, \vec{N}), \rho^*, \epsilon^*, \vec{N}^*) - M. \quad (3)$$

Здесь и далее измеренные физические величины будут обозначены звёздочкой.

При проектировании ТИС необходимо в соответствии с заданными ограничениями минимизировать ошибку (3):

$$|\delta| \rightarrow \min, \quad |\delta| \leq \delta_{\text{дон}}. \quad (4)$$

Обратимся к анализу структур и моделей двух типов ТИС: аналоговых и цифровых. Аналоговая ТИС (АТИС) – традиционный электроёмкостной топливомер, в котором преобразования измерительной информации являются в большинстве случаев линейными и аналоговыми, а уровень сигнала на выходе системы пропорционален количеству топлива (массе или объёму). В настоящее время АТИС применяются чаще всего в маневренных вертолётах и в малых маневренных самолётах.

Особенностями АТИС являются:

- наличие либо профилированных датчиков, функция которых повторяет нелинейную ТХ бака для режима крейсерского полёта ЛА с заданной погрешностью, либо линейных датчиков, если ТХ бака линейна в диапазоне измерений (редкий случай);
- высокая погрешность в остальных режимах эксплуатации ЛА;
- отсутствие вычислительных преобразований измерительной информации, следствием чего является повышенная надёжность работы.

Структура, отражающая преобразование измерительной информации в АТИС, показана на рис. 3.

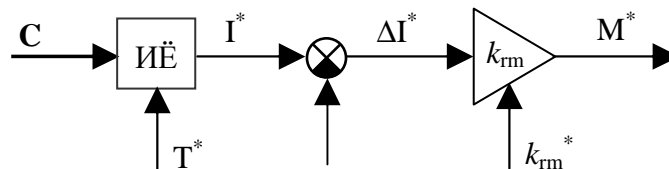


Рис. 3. Модель преобразования измерительной информации в АТИС.
Здесь ИЁ – измеритель ёмкости; I_0^* , k_{rm}^* – константы регулировок нуля и максимума ТИС;
 T^* – измеренная температура топлива

Функцией АТИС, согласно данной структуре, будет зависимость

$$M^* = G^*(\vec{C}, T^*) = k_{rm}^* \cdot \Delta I^* = k_{rm}^* \cdot (I^*(\vec{C}, T^*) - I_0^*), \quad (5)$$

которая, в идеальном случае, тождественна заданной, линейной относительно суммарной ёмкости датчиков, теоретической зависимости

$$M = G(\vec{C}, T) = \frac{f(T)}{C_y} \cdot \sum_i C_i, \quad (6)$$

где f – некоторая функция коррекции плотности и диэлектрической проницаемости топлива по температуре топлива; C_y – удельная ёмкость канала измерения, пФ/кг.

Цифровая ТИС (ЦТИС) – электроёмкостной топливомер, в котором преобразования измерительной информации являются нелинейными и вычислительными (с применением микропроцессоров), цифровая информация о количестве топлива в баках с выхода системы передаётся на индикатор и во внешние системы. В настоящее время ЦТИС применяются чаще всего в гражданской авиации. Особенности ЦТИС являются:

- наличие линейных датчиков;
- небольшая погрешность во множестве заданных режимах эксплуатации ЛА.

Структура, отражающая преобразование измерительной информации в ЦТИС, показана на рис. 4. Полученная с линейного измерителя электроёмкости величина силы тока превращается линейным же аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой код, который затем вступает в преобразования вычислительные. Их результатом является получение значения массы топлива в баках ЛА и выдача его в виде кода в индикатор, на пульт и в бортовые системы ЛА.

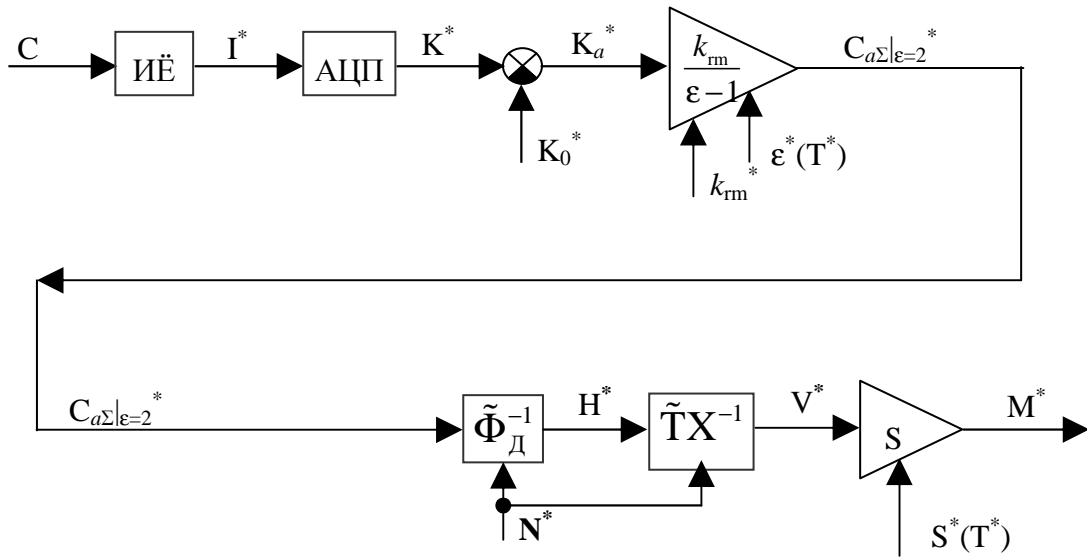


Рис. 4. Модель преобразования измерительной информации в ЦТИС.
Здесь ИЁ – измеритель ёмкости; K_0^* , k_{rm}^* – константы регулировок нуля и максимума ТИС;
 T^* – измеренная температура топлива;

Функцией ЦТИС, в соответствии со структурой рис. 4, будет зависимость

$$\begin{aligned}
 M^* &= G^*(\bar{C}, \rho^*(T^*), \varepsilon^*(T^*), \bar{N}^*) = \\
 &= S^*(T^*) \cdot \tilde{T}X^{-1}(\bar{N}^*, \tilde{\Phi}_D^{-1}(\bar{N}^*, C_{a\Sigma}^*|_{\varepsilon=2})), \\
 C_{a\Sigma}^*|_{\varepsilon=2} &= \frac{\lambda_C^* k_{rm}^*}{\varepsilon^*(T^*) - 1} \sum_{i=1}^Q (C_i - C_{i0}), \\
 S^*(T^*) &= k_{rmM}^* \cdot \rho^*(T^*), \\
 K &= \lambda_C^* \sum_{i=1}^Q C_i + \mu_C^*, \quad K_0 = \lambda_C^* \sum_{i=1}^Q C_{i0} + \mu_C^*,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $\tilde{T}X$ – расчётная ТХ бака; $\tilde{\Phi}_D$ – расчётная функция датчиков – зависимость активной суммарной ёмкости линейных датчиков (при ДП топлива, равной 2) от уровня топлива в баке для полученной измерительно-вычислительным путём нормали к СПТ \bar{N}^* ; Q – количество параллельно соединённых линейных датчиков в измерительном канале ТИС; k_{rm}^* – коэффициент регулировки максимума, устраняющей неточность измерения электроёмкости датчиков в заправленном баке, пФ⁻¹; λ_C^* – цена деления измерительной схемы ИЁ+АЦП, в пФ; μ_C^* – некоторая константа измерительной схемы; C_i – реальная полная ёмкость i -го датчика в процессе измерения, пФ; C_{i0} – реальная ёмкость i -го датчика в незаправленном баке, пФ; K_i , K_{i0} – соответствующие электроёмкостям коды, получаемые от АЦП; k_{rmM}^* – коэффициент регулировки максимума, устраняющий неточность косвенного измерения массы топлива в заправленном баке.

Расчёт ТХ сложен, поэтому в практике синтеза ТИС применяют конечное множество кусочно-линейных аппроксимаций ТХ, каждая из которых соответствует некоторой нормали к СПТ. Типичное семейство ТХ представлено графически на рис. 7.

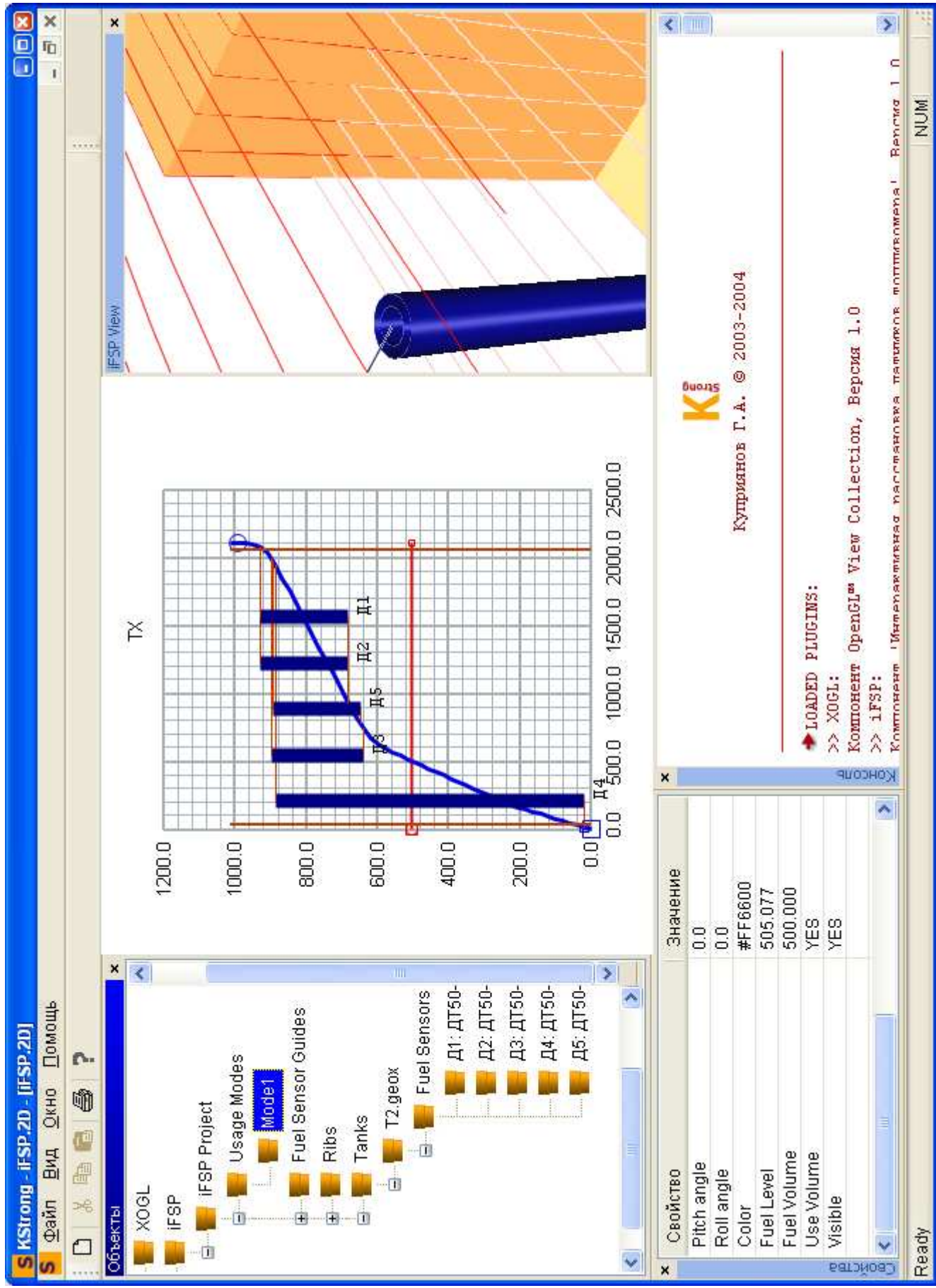


Рис. 6. Многокомпонентное ПО САПР ТИС: пользовательский интерфейс (снимок с экрана компьютера)

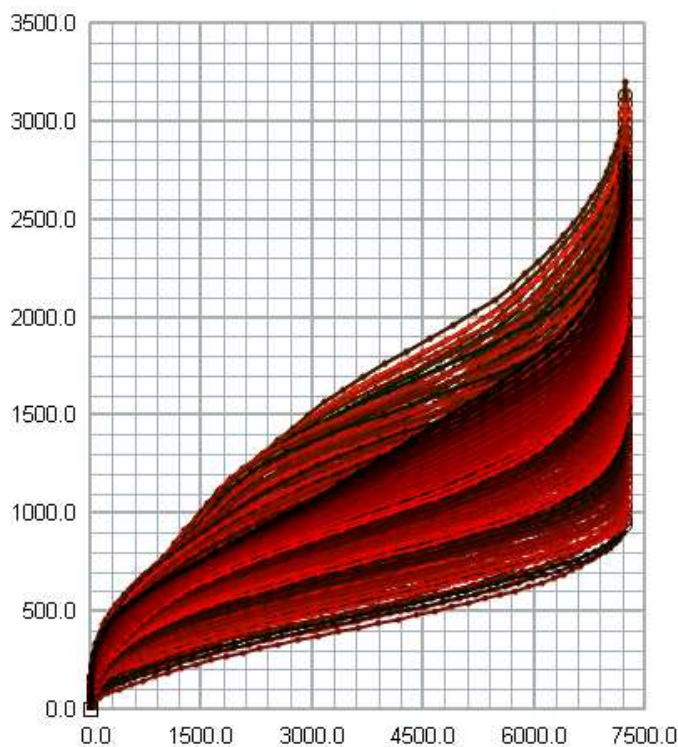


Рис. 7. Типичное семейство ТХ бака для множества нормалей к СПТ; на горизонтальной оси – объём топлива, на вертикальной – уровень топлива в баке

В свою очередь, математическая модель группы линейных датчиков является кусочно-линейной функцией и имеет вид

$$C_{a\Sigma}|_{\varepsilon=2} = \tilde{\Phi}_d(H, \vec{N}) = 2\pi\varepsilon_0 \sum_{i=1}^Q \frac{l_i(H, \vec{N})}{\ln(D_i d_i^{-1})}; \quad L_i = \left| \vec{V}_i^U - \vec{V}_i^L \right|, \quad (8)$$

$$l_i(H, \vec{N}) = \begin{cases} L_i, & H \geq h_i^U; \\ L_i \cdot \frac{H - h_i^L}{h_i^U - h_i^L}, & h_i^L < H < h_i^U; \\ 0, & H \leq h_i^L, \end{cases}$$

$$h_i^L = (\vec{V}_i^L - \vec{V}_T^L) \cdot \vec{N}, \quad h_i^U = (\vec{V}_i^U - \vec{V}_T^L) \cdot \vec{N},$$

$$\vec{V}_T^L : \vec{V}_T^L \cdot \vec{N} = \min_j (\vec{V}_{Tj} \cdot \vec{N}), \quad \vec{V}_{Tj} \in \hat{T},$$

где L_i – длина датчика; $l_i(H)$ – мера погружения i -го датчика в топливо; h_i^L и h_i^U – нижний и верхний уровни привязки i -го датчика к ТХ бака соответственно; \vec{V}_i^U и \vec{V}_i^L – нижняя и верхняя осевые точки датчика; \hat{T} – множество вершин многогранника, аппроксимирующего внутреннюю поверхность топливного бака; D_i и d_i – больший и меньший диаметры смежных поверхностей коаксиальных цилиндрических труб i -го датчика.

На основе описанной модели ТИС автором настоящего доклада разработаны и эксплуатируются инструмент САПР ТИС “Интерактивная расстановка датчиков топливомера”, ПО для расчёта ТХ баков некоторое другое и многокомпонентное ПО (рис.6; показан график с привязкой датчиков к ТХ бака и трёхмерное изображение датчика в баке), в том числе, для управления расчётами и визуализации их результатов. Рис. 7. получен с помощью одной из программ.

Литература

1. К.Б. Карандеев, Ф.Б. Гриневич, А. И. Новик. Ёмкостные самокомпенсированные уровнемеры. Библиотека по автоматике, вып. 195. М.-Л.: Изд-во “Энергия”, 1966.