

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривая важнейшие стороны процессов динамического контроля, очевидно, что для осуществления полной функциональной реакции контролируемой системы необходимо учитывать изменение внешней среды, которая формирует колебания параметров на её входах, приводящим к заметным, интегральным перестройкам как качественных, так и количественных свойств всех частей контролируемой системы.

В работе, для ответа на вопросы влияния внешней среды на контролируемую систему, используется аппарат объектно-ориентированного моделирования, позволяющий осуществлять:

моделирование первичной среды (или внешней среды), динамической базы данных (источник информации для ССВ (систем сенсорного воздействия));

- моделирование динамики взаимодействия бортовой системы с моделью внешней среды;

- создание базы данных для СИО (системы идентификации и оценки);

При этом бортовая топливная система будет реагировать на данные, полученные в ходе взаимодействия с определенной внешней средой (рис. 1). В нашем случае внешняя среда характеризуется такими существенными для динамического контроля параметрами как уровень топлива в баке воздушного судна, плотность топлива (его температура).

Вернемся к вопросу моделирования внешней среды. Что такое внешняя среда для топливной системы самолета, точнее для измерительной и управляющей подсистем? Казалось бы, это топливо объект, обладающий рядом характеристик, которые можно воспринимать и обрабатывать, представляя в виде информационного потока для информационно-управляющей системы, в данном случае для системы управления и измерения топлива СУИТ.

Важнейшей характеристикой топлива является его уровень в топливных баках. Но топливо - это часть среды и в полной мере не может представлять внешнюю среду, особенно с точки зрения динамики поведения. Для решения частной задачи, когда система СУИТ изолирована, такая ситуация, исключающая вопрос: откуда берется динамика поведения топлива, приемлема. При решении задачи, когда СУИТ работает в комплексе бортового оборудования, постоянно взаимодействуя с другими системами, ситуация меняется. Очевидно, что внешней средой для системы СУИТ является другая система или комплекс систем (рис. 2). Тогда топливо играет роль передаточного звена с двумя входами: объект, на который воздействуют и объект, который сам воздействует, то есть линия связи, обладающая рядом характеристик, различающихся в зависимости от воздействующей системы.

На рисунке показано, что внешней (воздействующей) средой для СУИТа могут быть двигатели; реакция самолета на внешние или системные возмущения; свои же подсистемы СУИТа, работающие в автоматическом режиме по программе; изменение балансировочного положения самолета (изменение центровки).

Логично предположить, что центральным объектом внешней среды все же являются двигатели, так как они однозначно и безвозвратно изменяют главную характеристику топлива - его количество, и как следствие, его уровень в баке.

Именно на эту характеристику реагирует система управления и измерения топлива, и именно эта характеристика лежит в основе определения объемно-массового количества топлива в баках. Поэтому необходимо произвести математическое моделирование работы топливной системы как функциональной зависимости от этой характеристики.

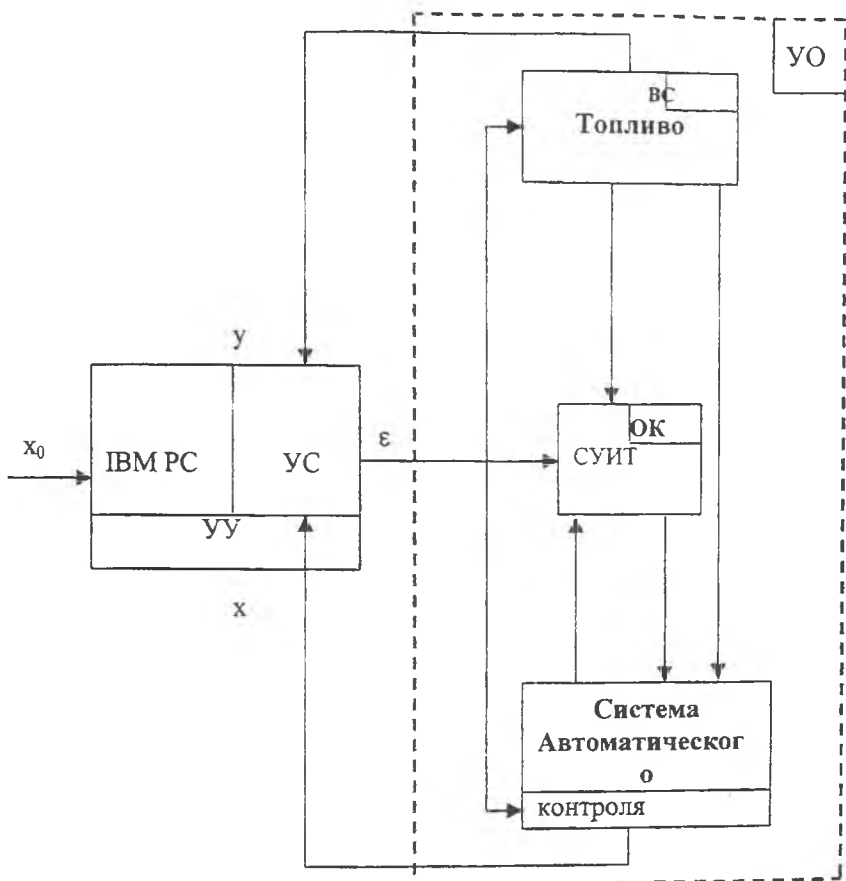


Рис. 1. Диагностическая система управления.

На всех современных воздушных судах используется электро-ёмкостной метод измерения количества топлива в баках. Ёмкостные датчики представляют собой профилированную цилиндрическую емкость. Поэтому

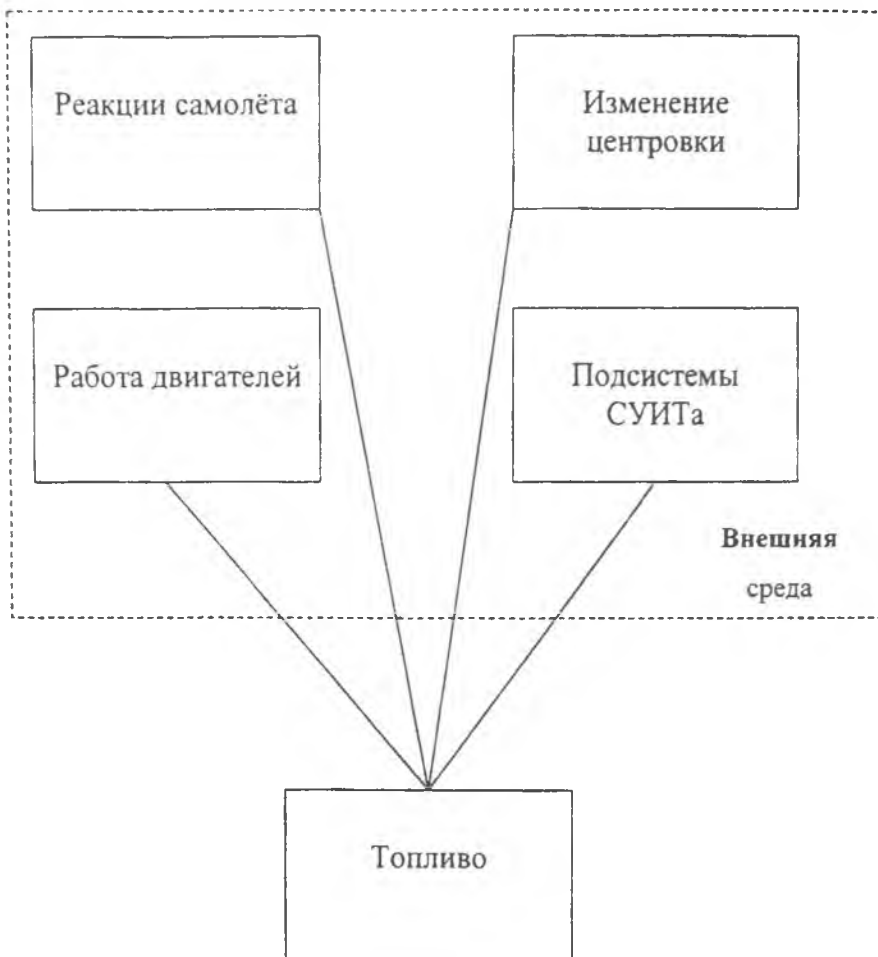


Рис. 2. Представление о внешней среде.

за основу возьмем физическую зависимость (1), определяющую величину емкости такого датчика;

$$C = k \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot l_1 + \varepsilon_2 \cdot l_2}{\lg \frac{D_2}{D_1}} \quad (1)$$

k - постоянный коэффициент;

ε_1 - диэлектрическая проницаемость воздуха;

l_1 - длина части датчика, не залитая топливом;

ε_2 - диэлектрическая проницаемость топлива;

l_2 - длина части датчика, залитая топливом;

D_2 - внутренний диаметр наружной трубы;

D_1 - наружный диаметр внутренней трубы.

Как видно, величина емкости датчика зависит лишь от величин l_1 и l_2 (ϵ_1 , ϵ_2 , D_1 и D_2 - постоянные величины). Так как намного удобнее оперировать только одной величиной, приведем зависимость величины емкости датчика как функцию от длины датчика, залитой топливом.

Учитывая, что общая рабочая длина датчика равна

$$l_1 + l_2 = L$$

приведем зависимость (1) к более рабочему виду:

(2)

$$C = k \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot l_1 + \epsilon_2 \cdot l_2}{\lg \frac{D_2}{D_1}} = k \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot (L - l) + \epsilon_2 \cdot l}{\lg \frac{D_2}{D_1}} = A \cdot [\epsilon_1 \cdot (L - l) + \epsilon_2 \cdot l] \quad (3)$$

где l - длина части датчика, залитая топливом.

A - постоянный коэффициент, определяющий геометрию датчика.

Так как величина $\epsilon_1 \cdot L$ является постоянной, запишем выражение (3) так:

$$C = A \cdot (\epsilon_1 \cdot L - \epsilon_1 \cdot l + \epsilon_2 \cdot l) = A \cdot (B + \Delta \epsilon \cdot l) \quad (4)$$

где $\Delta \epsilon$ - разница ($\epsilon_2 - \epsilon_1$) диэлектрических проницаемостей топлива и воздуха.

Таким образом, выражение для величины емкости датчика может быть представлено как функциональная линейная зависимость:

$$C(l) = D \cdot l + E \quad (5)$$

где D , E - константы:

$$D = \frac{k}{\lg \frac{D_2}{D_1}} \cdot (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

$$E = \frac{k}{\lg \frac{D_2}{D_1}} \cdot L \cdot \epsilon_1$$

Так как профиль баков имеет нелинейную характеристику и каждый датчик, соответственно, имеет свой уровень установки, то величина l (l_2) - длина части датчика, залитая топливом, будет индивидуальна для каждого датчика, и пользоваться ею в расчетах неудобно. Более целесообразно использовать приведенный уровень топлива

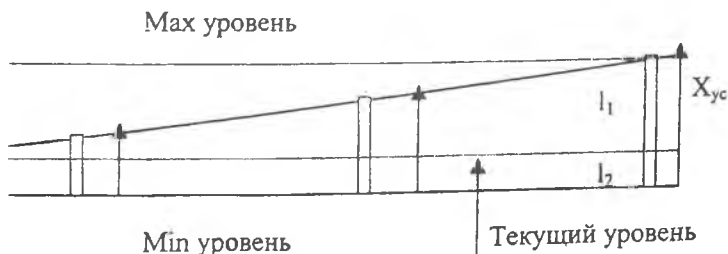


Рис. 3. Различные уровни установки датчиков.

На рис. 3 $l_{пр} = X_{yc} - l_1$, следовательно, $l_1 = X_{yc} - l_{пр}$, где X_{yc} - уровень установки датчика по верхнему фланцу относительно нулевого уровня топлива.

Тогда перепишем выражение (5) в виде:

$$\begin{aligned}
C &= D(L - l_1) + E = D(L - X_{yc} + l_{np}) + E = \\
&= D l_{np} + D(L - X_{yc}) + E = D l_{np} + M \\
\text{где } M &- \text{ константа, равная } M = D(L - X_{yc}) + E
\end{aligned} \tag{6}$$

В качестве примера составим уравнения, описывающие топливо как объект внешней среды для самолета Ту-204:

$$C_{1s}(l_{np1}) = \sum_{i=1}^3 C_{1si}(l_{np1})$$

$$C_{1n}(l_{np1}) = \sum_{i=1}^3 C_{1ni}(l_{np1})$$

$$C_{2s}(l_{np2}) = \sum_{i=1}^7 C_{2si}(l_{np2})$$

$$C_{2n}(l_{np2}) = \sum_{i=1}^7 C_{2ni}(l_{np2})$$

$$C_3(l_{np3}) = \sum_{i=1}^4 C_{3i}(l_{np3})$$

$$C_4(l_{np4}) = \sum_{i=1}^4 C_{4i}(l_{np4})$$

$$C_{pol}(l_{np.pol}) = \sum_{i=1}^3 C_{poli}(l_{np.pol})$$

$$C_{po2}(l_{np.po2}) = \sum_{i=1}^3 C_{po2i}(l_{np.po2})$$

где нижние индексы указывают на номер и положение топливного бака, а переменная суммы "i" на количество ёмкостных датчиков в данном баке.

Таким образом, мы получили полный набор зависимостей $C = C(l_{np})$

Теперь зададимся вопросом - как изменяется значение величины l_{np} со временем, т.е.:

$$l_{np} = f(t)$$

Так как профиль топливных баков имеет нелинейную характеристику, то легко предположить, что изменение величины l_{np} также будет иметь нелинейный характер, следовательно и зависимость $C(l_{np})$ также будет нелинейна. Такая ситуация неудобна как для работы самой системы СУИТ, так и для моделирования, поэтому внутренняя труба ёмкостных датчиков профилируется таким образом, чтобы получить зависимость ёмкости датчика от его длины, повторяющей зависимость объема топлива в баке от высоты уровня топлива.

Таким образом, примем заведомое упрощение, вполне допустимое для модели первого приближения, что нелинейность величины ёмкости датчика от его длины полностью компенсирует нелинейность изменения величины уровня топлива в баке.

Более того, для процессов моделирования и поставленных целей использование величины уровня топлива в баках не играет существенной роли и даже не совсем удобно, так как основной элемент внешней среды - двигатели - которые для нас характеризуется в основном расходом топлива как зависимости от числа М (скорости полета), высоты полета, величины α -РУД (режима полета), поэтому, учитывая, что изменение значения величины ёмкости принято линейным, построим линейную зависимость величины массы топлива в баке от величины ёмкости датчиков (или наоборот), тем самым, создавая простую зависимость изменения количества топлива от величины расхода.

$$m(C) = a \cdot C + b$$

(7)

Определить коэффициенты a , b зависимости (7) можно, зная:

- значение ёмкости сухих датчиков C_0 ;
- диэлектрическую проницаемость топлива ϵ_2 ;
- максимальную массу загружаемого топлива в баках $M_{\max}$.

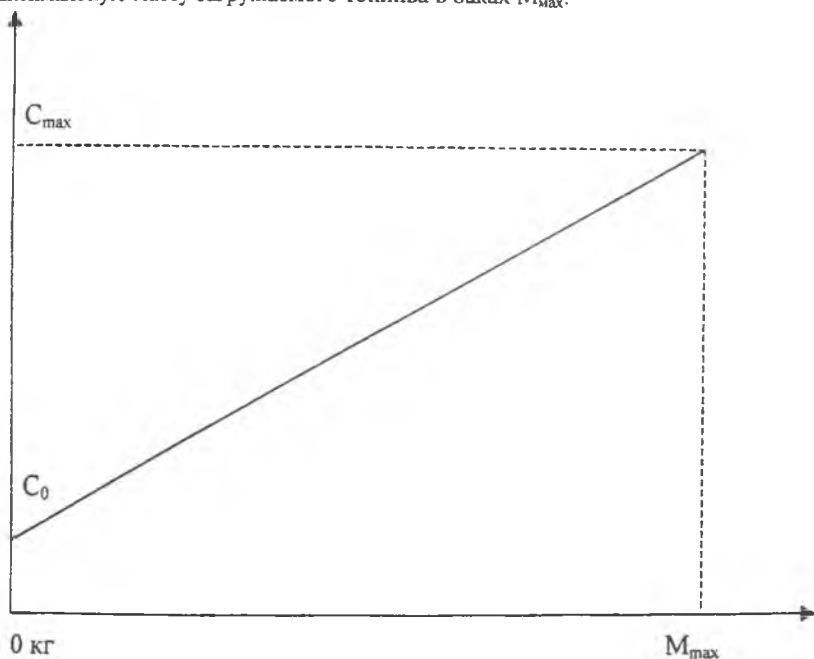


Рис. 4. Упрощённая характеристика зависимости ёмкости датчиков от массы топлива в баках.

Найдем коэффициенты a , b уравнения (7) и определим зависимость $m(C)$ или $C(m)$.

$$\begin{cases} 0 = a \cdot C_0 + b \\ M_{\max} = a \cdot C_{\max} + b \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} b = -a \cdot C_0 \\ M_{\max} = a \cdot C_{\max} - a \cdot C_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = \frac{M_{\max}}{C_{\max} - C_0} \\ b = -\frac{M_{\max} \cdot C_0}{C_{\max} - C_0} \end{cases}$$

$$m(C) = \frac{M_{\max}}{C_{\max} - C_0} \cdot (C - C_0) \quad (8)$$

На основе зависимости (8) для примера можно построить ряд простых математических моделей топливной системы различной конфигурации. На рис. 5. приведены две подобные простейшие системы соответственно с двумя и тремя элементами. C_1 – величина расхода двигателя или производительность насосов в соответствующих баках. Примем, что порционер в расходном баке «Р» работает по перепаду топлива в 500 кг. Договоримся, что C_p постоянна на определённом режиме, а режим состоит из циклов, где продолжительность цикла равна:

$$t_u = \frac{500}{C_p} + \frac{500}{C_1} \text{ для случая «а» на рис. 5.}$$

$$t_u = \frac{500}{C_p} + \max\left(\frac{500}{C_1}, \frac{500}{C_2}\right) \text{ для случая «б»}.$$

Модель для случая «а» примет вид:

$$\begin{cases} m_p(t) = M_p - C_p \cdot t + C_1 \cdot t \cdot L(t) \\ m_1(t) = M_1 - C_1 \cdot t \cdot L(t) \end{cases}$$

где $L(t)$ – логическая функция:

$$L(t) = \begin{cases} 1, t > \frac{500}{C_p} - u - m_1(t) > 0 \\ 0, t \leq \frac{500}{C_p}, \text{ или } m_1(t) = 0 \end{cases}$$

Тогда модель для случая «б» будет:

$$\begin{cases} m_p(t) = M_p - C_p \cdot t + C_1 \cdot t \cdot L_1(t) \\ m_1(t) = M_1 - C_1 \cdot t \cdot L_1(t) + C_2 \cdot t \cdot L_2(t) \\ m_2(t) = M_2 - C_2 \cdot t \cdot L_2(t) \end{cases}$$

где логические функции $L_1(t)$ и $L_2(t)$ имеют вид:

$$L_1(t) = \begin{cases} 1, t > \frac{500}{C_p} - u - m_1(t) > 0 \\ 0, t \leq \frac{500}{C_p}, \text{ или } m_1(t) = 0 \end{cases}$$

$$L_2(t) = \begin{cases} 1, t > \frac{500}{C_p} - u - m_2(t) > 0 \\ 0, t \leq \frac{500}{C_p}, \text{ или } m_2(t) = 0 \end{cases}$$

Соответственно, имея в наличии структуру топливной системы реального самолёта, а также программы выработки топлива, программы заправки топлива, программы

выравнивания и центровки, можно составить математические модели для каждого из этих режимов по приведённой выше методике.

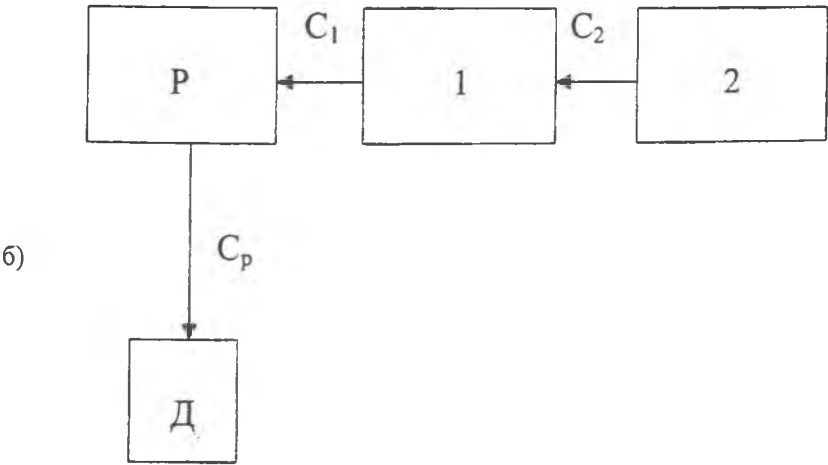
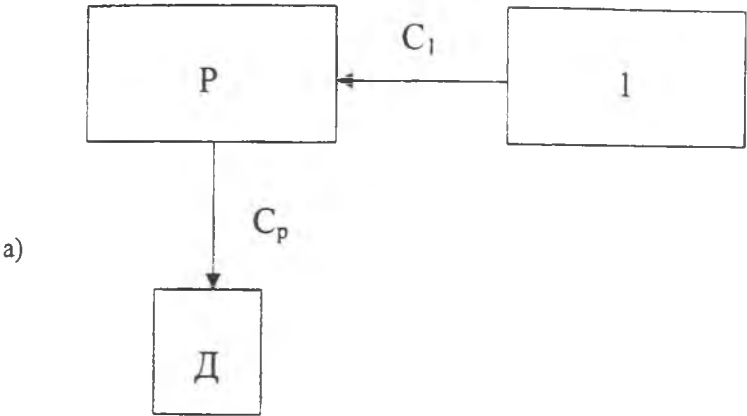


Рис. 5. Несимметричная модель из 2-х элементов (а) и несимметричная модель из 3-х элементов (б).