

УДК 629.735

Е.В. ПАВЛЮК¹, С.В. ЕПИФАНОВ², С.И. СУХОВЕЙ², Т.В. КУЛИК²¹ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АГРЕГАТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ САУ ГТД

На основе опыта разработки САУ ГТД различных типов выполнена систематизация процесса преобразования математических моделей гидромеханических агрегатов в ходе проектирования и доводки САУ. Выделены четыре этапа, на каждом из которых к математическим моделям гидромеханических агрегатов предъявляются специфические требования. Эти требования определяют вид и степень детализации математических моделей. Основная тенденция в преобразовании математических моделей ГМЧ заключается в последовательном уменьшении детализации и упрощении с целью сокращения трудозатрат на их реализацию и доводку, а также для снижения вычислительных затрат с целью обеспечения работы в реальном масштабе времени. Эффективность такого подхода к формированию математических моделей агрегатов ГМЧ неоднократно подтверждена в процессе стендовых и летных испытаний САУ ГТД.

Ключевые слова: математическая модель, гидромеханический агрегат, модель гидромеханической части (ГМЧ) агрегата, САУ ГТД.

Введение

Гидромеханическая часть (ГМЧ) САУ современного авиационного ГТД обладает рядом существенных особенностей, которые необходимо учитывать разработчику при проектировании, доводке агрегатов автономно и в составе САУ. К числу таких особенностей относятся:

- объединение в ГМЧ физически разнородных элементов (электрических, механических, гидравлических);
- существенная нелинейность, как следствие наличия гидравлических элементов с нелинейными характеристиками;
- большая зона нечувствительности, связанная с наличием сухого трения в элементах преобразования электрического сигнала управления в механический или гидравлический сигнал;
- смещение зоны нечувствительности (дрейф нуля) вследствие различного влияния утечек в гидравлических элементах при различных температурах и при работе на загрязненном топливе;
- наличие внутренних обратных связей (например, в сервомеханизмах и регуляторах расхода);
- наличие элементов, отличающихся по динамическим характеристикам на несколько порядков, и др.

Учет в детальной математической модели всех указанных особенностей ГМЧ приводит к существенно нелинейной модели высокого порядка (на практике до 12-го порядка).

Математические модели ГМЧ используются на различных этапах разработки САУ для решения различных задач. На каждом из этапов к ним предъявляются специфические требования. Обобщение опыта разработки и доводки САУ ГТД различных типов [1 – 3] позволило выделить четыре вида (модификации) математических моделей ГМЧ. Рассмотрим модификацию математических моделей ГМЧ для различных этапов разработки САУ на примере модели ГМЧ насоса-дозатора основного топлива.

1. Отработка ГМЧ агрегата (этап 1)

На первом этапе математическая модель предназначена для решения следующих задач:

- выбор элементов и их параметров, обеспечивающих удовлетворение заданных технических требований по функционированию и быстродействию;
- оптимизация структуры и параметров с целью исключения автоколебаний в контурах ГМЧ;
- формирование способа модуляции сигнала управления, обеспечивающего максимальное

уменьшение зоны нечувствительности.

Основное требование к математической модели на первом этапе – высокая степень детализации с учетом всех нелинейностей во всем диапазоне изменения параметров элементов.

Математическая модель насоса-дозатора топлива включает следующие уравнения:

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_v \frac{d\alpha}{dt} &= K_i \cdot i, \\ m_k \frac{d^2 x}{dt^2} + K_{vk} \frac{dx}{dt} + K_k x &= S_k (p_n - p_d), \\ G_d &= \rho S_k \frac{dx}{dt}, \\ G_n &= K_{под} n - K_{ут} p_n, \\ G_t &= K_d \alpha \sqrt{p_n - p_\phi}, \\ G_{кп} &= K_{кп} (x - x_0) \sqrt{p_n}, \\ p_\phi &= p_k + K_\phi G_t^2, \\ p_d &= p_\phi + K_d G_d^2, \\ G_{тф} &= G_n - G_{кп} + G_d, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угловое положение дозирующего элемента (ДЭ); i – ток управления; J – момент инерции ротора; K_v , K_i – коэффициенты вязкого трения и крутящего момента ДЭ; m_k – масса поршня клапана постоянно перепада давления (КППД); x , x_0 – текущее и начальное положения поршня КППД; K_{vk} , K_k – коэффициенты вязкого трения и жесткости пружины КППД; $K_{кп}$, K_d , K_ϕ , $K_{доз}$ – коэффициенты расхода КППД, демфера КППД, форсунок, дозатора; $K_{под}$, $K_{ут}$ – коэффициенты подачи и утечек в насосе; S_k – площадь КППД; p_n , p_d , p_ϕ – давление топлива за насосом, в демферной полости КППД, перед форсунками; ρ – плотность топлива; G_d , G_n , $G_{кп}$, G_t , $G_{тф}$ – расход топлива через демфер, насос, КППД в слив, дозирующий элемент, в камеру сгорания; n – частота вращения качающего узла; p_k – давление воздуха за компрессором.

Даже для относительно простого агрегата получилась достаточно сложная математическая модель. Для ГМЧ сложных агрегатов, таких как регулятор сопла или дозатор форсажного топлива, детальные математические модели имеют более высокий порядок. Они представляют собой системы дифференциальных и нелинейных алгебраических уравнений, требующих совместного решения.

Их реализация может вызывать затруднения, а работа в реальном масштабе времени в ряде случаев невозможна.

Поэтому на последующих этапах доводки САУ возникает необходимость преобразования таких математических моделей с целью их упрощения.

2. Разработка алгоритмов управления, реализуемых электронной частью САУ (этап 2)

На этом этапе с помощью математической модели выполняют:

- выбор структуры и параметров законов управления, обеспечивающих устойчивость и качество регулирования во всех контурах управления САУ, включая контур управления расходом топлива;
- отработку переходов между различными программами регулирования параметров ГТД.

Такие математические модели должны обеспечивать возможность анализа влияния динамических характеристик элементов ГМЧ на динамические характеристики различных контуров управления САУ, включая контур управления расходом топлива. Несущественные элементы исключаются из модели.

Математическая модель насоса-дозатора будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_v \frac{d\alpha}{dt} &= K_i \cdot i, \\ G_t &= K_G \alpha_0, \\ G_{отб} &= K_{гц} |V|, \\ G_n &= K_{под} n, \\ T_{кп} \frac{dG_{кп}}{dt} + G_{кп} &= G_n - G_t - G_{отб}, \\ G_{тф} &= G_n - G_{отб} - G_{кп}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $G_{отб}$ – отбор топлива на перемещение гидроцилиндра потребителя; $K_{гц}$ – коэффициент, учитывающий расход топлива на заполнение гидроцилиндра при перемещении поршня; V – скорость перемещения поршня; $T_{кп}$ – постоянная времени КППД.

Динамика КППД в этом случае описывается аperiodическим звеном первого порядка, аппроксимирующим динамические свойства КППД, представленные в системе уравнений (1). В [4] рассмотрен пример использования упрощенной математической модели насоса-дозатора для доводки САУ вспомогательной силовой установки.

3. Отработка электрической части САУ на полунатурных моделирующих стендах (этап 3)

На этом этапе математические модели, работая в реальном времени, должны обеспечивать возможность:

- проверки функциональной работоспособности аппаратной части;
- проверки эффективности использованных решений в аппаратной части (фильтрация шумов в

измерительных цепях, формирование управляющего и модулирующего сигналов, взаимодействие аппаратных модулей);

– тестирования программного обеспечения.

Такие математические модели строятся с учетом следующих требований:

- понижение порядка системы;
- линеаризация гидравлических характеристик;
- учет нелинейностей типа «сухое трение» (зона нечувствительности и ее смещение).

Рассматриваемая математическая модель насоса-дозатора на этом этапе имеет следующий вид:

$$i_1 = \begin{cases} i + i_H - i_0, & \text{при } i < i_0 - i_H; \\ 0, & \text{при } i_0 - i_H \leq i \leq i_0 + i_H; \\ i - i_H - i_0, & \text{при } i > i_0 + i_H; \end{cases}$$

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_v \frac{d\alpha}{dt} = K_i \cdot i_1; \quad (3)$$

$$G_T = K_d^* \alpha + G_{T \min},$$

где i_1 – ток управления с учетом зоны нечувствительности; i_H , i_0 – величина (половина) и смещение зоны нечувствительности; K_d^* – коэффициент расхода дозирующего элемента; $G_{T \min}$ – расход топлива на минимальном уровне.

Такая математическая модель пренебрегает динамикой КППД, так как она несущественна для решаемых с помощью этой модели задач.

4. Разработка встроенной системы контроля (ВСК) (этап 4)

На этом этапе решаются следующие задачи:

– обеспечение работы в реальном масштабе времени;

– определение отказа или предотказного состояния агрегатов ГМЧ в соответствии с выбранной номенклатурой выделяемых состояний агрегатов.

В простейшем случае ВСК может включать один интегральный диагностический критерий, выделяющий два состояния агрегата (рабочее и нерабочее) без выделения причин, вызвавших отказ.

Ниже приведен пример реализации такого подхода при формировании ВСК насоса дозатора:

$$\Delta = \alpha_3 - \alpha,$$

$$\frac{dE}{dt} = \begin{cases} \Delta, & |\Delta| \geq \Delta_{\max}, \\ 0, & |\Delta| < \Delta_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

$$F = \begin{cases} 1, & E \geq E_{\max}, \\ 0, & E < E_{\max}, \end{cases}$$

где Δ – рассогласование по положению ДЭ; α_3 – заданное значение положения ДЭ; Δ_{\max} – предельно допустимое отклонение фактического положения ДЭ от заданного значения; E – накопленное значение ошибки контура управления положением ДЭ;

E_{\max} – предельное значение ошибки; F – признак отказа агрегата.

Очевидно, что признак отказа агрегата по приведенному критерию сформируется и в случае увеличения сил трения в ГМЧ агрегата, и в случае выхода из строя выходного каскада, формирующего ток управления. Однако реакция на эту ситуацию в эксплуатации и в том и в другом случае будет одинаковой – замена агрегата. Поэтому в ряде случаев использование подобных критериев в ВСК может быть обосновано.

В перспективе система диагностирования исполнительных устройств и САУ в целом, в частности, ВСК, будет развиваться в направлении перехода от контроля исправности агрегата в целом к распознаванию причин (неисправностей). Для формирования соответствующих алгоритмов распознавания потребуются более совершенные модели – диагностические математические модели, обеспечивающие моделирование динамики агрегатов и системы в целом не только в исправном состоянии, но и во всех возможных неисправных состояниях, подлежащих распознаванию.

При синтезе алгоритмов диагностирования эти модели выполняют три функции: 1) являются носителями исходной информации о статических и динамических свойствах агрегатов и системы, которая используется для формирования алгоритмов; 2) могут быть непосредственно интегрированы в состав алгоритмов распознавания; 3) используются как имитаторы при отработке алгоритмов диагностирования.

Для выполнения перечисленных функций необходимы модели, которые по степени детализации описания соответствуют первому, а по быстродействию – третьему из рассмотренных выше этапов.

Заключение

На основе опыта разработки САУ для ГТД различных схем обобщен подход к формированию и преобразованию математических моделей ГМЧ агрегатов двигателей на различных этапах создания и доводки САУ.

Вид и степень детализации математических моделей определяется задачами, решаемыми на каждом из этапов и специфическими требованиями, предъявляемыми к ним. Основная тенденция в преобразовании математических моделей ГМЧ заключается в последовательном уменьшении детализации и упрощении с целью сокращения трудозатрат на их реализацию и доводку, а также для снижения вычислительных затрат с целью обеспечения работы в реальном масштабе времени. Эффективность такого подхода к формированию математических моделей агрегатов ГМЧ неоднократно подтверждена в процессе стендовых и летных испытаний САУ ГТД.

Литература

1. Адаптивная САУ расходом топлива с приводом дозатора от электромеханического преобразователя [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой, С.Н. Емельянов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 4 (30). – С. 92 – 95.

2. Павлюк, Е.В. Синтез контура управления частотой вращения свободной турбины вспомогательной силовой установки [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 8(16). – С. 110 – 113.

3. Исследование динамических свойств контура управления частотой вращения свободной турбины вертолетной двигательной установки [Текст] / С.В. Безуглый, С.В. Епифанов, Е.В. Павлюк, С.И. Суховой // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10(26). – С. 158 – 162.

4. Согласование контура управления механизацией служебного компрессора с контуром управления подачей топлива для обеспечения ГДУ компрессора ВСУ [Текст] / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой, Р.Л. Зеленский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 10(87). – С. 218 – 221.

Поступила в редакцию 12.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

МОДИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АГРЕГАТИВ ГІДРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ РОЗРОБКИ САК ГТД

Е.В. Павлюк, С.В. Єпифанов, С.І. Суховій, Т.В. Кулік

На основі досвіду розробки САК ГТД різних типів виконано систематизацію процесів перетворення математичних моделей гідромеханічних агрегатів у ході проектування і доведення САК. Відокремлено чотири етапи, на кожному з яких до математичних моделей гідромеханічних агрегатів висуваються специфічні вимоги. Ці вимоги визначають вид і ступінь деталізації математичних моделей. Головна тенденція в перетворенні математичних моделей ГМЧ складається у послідовному скороченні деталізації та спрощенні з метою скорочення трудовитрат на їх реалізацію і доведення, а також для зниження обчислювальних витрат з метою забезпечення роботи в реальному масштабі часу. Ефективність такого підходу до формування математичних моделей агрегатів ГМЧ неодноразово підтверджено в процесі стендових и льотних випробувань САК ГТД.

Ключові слова: математична модель, гідромеханічний агрегат, модель гідромеханічної частини (ГМЧ) агрегату, САК ГТД.

HYDROMECHANICAL AGGREGATES MATHEMATICAL MODELS MODIFICATION AT DIFFERENT STAGES OF TURBINE ENGINES AUTOMATIC CONTROL SYSTEM DESIGN

Y.V. Pavlyuk, C.V. Yepifanov, S.I. Suchovey, T.V. Kulik

Basing on experience of the gas turbine ACS development the systematization of the hydromechanical aggregates mathematical models transformation process during ACS design and development has been done. There are separated four stages characterized with different specific requirements to hydromechanical aggregates models. These requirements determine view and level of mathematical models specification. The major trend in mathematical models transformation consists in consequent specification decreasing and simplification to decrease labor costs on their design and development, and also to decrease the computing resources for providing a real-time operation. Efficiency of this approach to the hydromechanical aggregates mathematical models forming is repeatedly approved at gas turbine ACS test-bed and flight testing.

Key words: mathematic model, hydromechanical aggregate, model of aggregate hydromechanical part, gas turbine ACS.

Павлюк Евгений Викторович – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", Харьков, Украина, e-mail: pav_ev@ukr.net.

Епифанов Сергей Валериевич – заведующий кафедрой конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Суховой Сергей Иванович – доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Кулик Тамара Васильевна – старший научный сотрудник ПНИЛ диагностики авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.