УДК 629.7.036.54-63

ЭЛЕМЕНТЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПРОЦЕССА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ НОВОВВЕДЕНИЙ И КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ

В.П. Иванов, Е.Б. Каблова, Л.Г. Кленовая

Рассмотрены аспекты проблемы создания надежных и безопасных сложных технических систем, связанные со способом производства и технологией изготовления. Показано, что существенную роль в решении этой проблемы играет эволюционный принцип совершенствования характеристик сложных систем. Предложен один из возможных вариантов формализации процесса эволюции системы, основанный на анализе множества движений системы при поэтапной реализации нововведений. Получено уравнение, характеризующее изменение уровня надежности системы с учетом контроля функционирования каждой новой версии.

Ключевые слова: надежность, безопасность, технология, изготовление сложной технической системы, эволюционный принцип, совершенствование характеристик системы.

ВВЕДЕНИЕ

Под сложными техническими системами (СТС) понимаются системы, которые характеризуются многоуровневой иерархической структурой, разнообразием «поведения», большой размерностью пространства состояний и большим числом элементов, способностью взаимодействовать со средой (приспосабливаться к окружающей среде и оказывать на нее воздействие).

Для таких объектов характерна неполнота знаний физико-химических процессов, лежащих в основе их функционирования, технологии изготовления и условий применения. Эти факторы служат причинами ошибок проектирования, дефектов производства и нарушений в правилах эксплуатации, которые могут вызывать отказы и аномальные отклонения в работе объектов. Причиной отказов могут быть и ошибочные действия людей.

При решении проблемы надежности и безопасности сложных систем возникло понимание, что истоки отказов и аномалий в их работе лежат в способе производства, технологии изготовления, принципах организации трудовой деятельности людей. Данным аспектам проблемы посвящено значительное число публикаций (см., например, [1—6]). Как показано в работе [7], возможность изготовления работоспособных СТС в значительной мере определяется иерархическим принципом организации процесса производства, позволяющим с помощью промежуточного контроля выбраковывать и заменять неисправные элементы и узлы, а не всего изделия. Тем не менее, при автономных испытаниях элементов, как правило, не удается полностью учесть все эксплуатационные условия и приходится проводить дорогостоящие комплексные испытания узлов и объекта в целом.

В плане обеспечения надежности и безопасности СТС существенную роль играет еще один принципиальный фактор. Создание сложных систем не является одномоментным актом изготовления окончательно выбранных вариантов по заранее известным технологиям, а происходит путем проб и ошибок на модельных, неполноразмерных образцах и других прототипах изделия [1, 4].

Путем экспериментальной отработки каждой новой версии восполняется недостающая информация и подтверждается правильность конструкторских, технологических и других нововведений.

Улучшение технических характеристик каждой новой версии системы связано с использованием новых более эффективных принципов действия элементов системы и более глубоких представлений о физических процессах, лежащих в основе ее функционирования. В результате ряда итераций, другими словами, эволюции, система приближается к некоторому предельному уровню характеристик качества, достижимых в рамках изделия данного вида. Важно отметить, что при этом сохраняется требуемый уровень надежности и безопасности.

Примером могут служить бортовые системы управления ракет-носителей, которые в своем развитии прошли путь от форм построения на основе дезинтеграции на простейшие подсистемы и использования элементной базы 1950-х гг. до современных интегрированных систем управления [8, 9] в состав которых входят высокопроизводительные бортовые вычислительные комплексы.

Поскольку эволюция играет существенную роль при создании сложных технических систем, имеет смысл сформулировать условия эффективного построения эволюционного процесса в виде некоторых основополагающих принципов:

- на всех этапах эволюции СТС должна сохранять принципиальные свойства, присущие изделиям данного вида;
- переход к новой, более совершенной модификации изделия связан с нововведениями;
- новая СТС сохраняет преемственность со старыми, предшествующими образцами изделия;
- новое изделие создается на основе работоспособного, надежного прототипа;
- каждое изделие с нововведениями проходит этап отработки.

Первые два принципа определяют необходимые условия эволюции изделия к облику с наиболее совершенными функциональными свойствами. Остальные принципы определяют условия, при которых в процессе эволюции сохраняется требуемый уровень надежности и безопасности изделия.

Обсудим возможные пути формализации эволюционного процесса совершенствования характеристик СТС.

1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПРОЦЕССА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрим в качестве примера динамическую систему, работающую на заданном конечном интервале времени.

В основе функционирования динамической системы лежат определенные физические принципы и закономерности. Так, например, функционирование ракеты-носителя с ЖРД опирается на законы механики, аэродинамики, гидродинамики, теплотехники и др. В результате формализации имеющихся знаний физических законов могут быть получены математические уравнения, описывающие поведение технического объекта как динамической системы.

Пусть объект управления описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{x}_m = f_m(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t), \quad x_m(t) \in X_m \subset E^{k_m},$$
$$w_m(t) \in W_m \subset E^{v_m}, \quad t \in [t_0, T_m], \quad m = 1, 2, ..., M,$$
$$x_m(0) = x_{0m} \in X_{0m}, \quad \mu_m \in M_m, \qquad (1)$$

где m — номер этапа эволюционного процесса, которому соответствует заданное техническое решение, определяющее принципы построения, конструктивное воплощение и технологию изготовления системы; $x_m(t)$ — вектор фазовых координат системы, его размерность равна k_m; f_m — известная вектор-функция, полученная путем формализации научных и инженерных знаний о системе, проектируемой в рамках принятого технического решения; x_{0m} — вектор начальных условий; μ_m — вектор параметров, характеризующих режимы функционирования системы (включая возмущенные режимы и нештатные ситуации); $w_m(t)$ — вектор-функция управляющих воздействий; T_m — момент достижения цели управления (терминальный момент времени).

Отметим, что размерности пространств, в которых определяются фазовые координаты $x_m(t)$, управляющие воздействия $w_m(t)$ и ограничивающие их области, зависят от номера m.

Управляющие воздействия выбираются из класса вектор-функций вида

$$w_m = w_m(u_m, t), \quad u_m \in E^{r_m}, \qquad (2)$$

где u_m — вектор параметров программы управления (2).

Цель управления задается краевыми условиями:

$$\varphi_m^l(x_m(t), t) = \varphi_{з\,m}^l, \quad l = \overline{1, L_m}, \quad L_m \le r_m. \qquad (3)$$

Определим множество целей, достижимых рассматриваемой динамической системой:

$$\varphi_{з\,m} = \{\varphi_{з\,m}^l, \; l = \overline{1, L_m}\}, \quad \varphi_{з\,m} \in \Phi_{з\,m}.$$

Для достижения цели система выбирает параметры $u_m(t)$ программы управления (2) и, исходя из заданных краевых условий, назначает терминальный момент времени $t = T_m$, служащий дополнительным параметром управления.

Принимая во внимание возможность ошибок управления, введем понятие невязок краевых условий в выбранный терминальный момент времени T_m:

$$z_m = \{z_m^l = \varphi_m^l(x_m(T_m),\ T_m) - \varphi_{з\,m}^l,\ l = \overline{1, L_m}\}. \quad (4)$$

Кроме терминальных условий (4), будем рассматривать также показатели интегрального типа:

$$I_{mn} = \int_{t_0}^{T_m} g_{mn}(x_m,\ \mu_m,\ w_m,\ \tau)d\tau, \quad n = 1, 2, ..., N_m, \quad (5)$$

где g_{mn} — известная знакоопределенная функция, физическое содержание которой могут составлять затраты энергетического ресурса, времени, потери на управление.

Будем считать, что сформулированная задача управления решается при всех заданных параметрах режимов функционирования $\mu_m \in \mathrm{M}_m$, т. е. цель управления (3) достигается с приемлемыми показателями качества (4) и (5).

Совершенствование технических решений, лежащих в основе построения динамической системы, предполагает улучшение показателей терминального (4) и интегрального (5) типов, расширение областей начальных и текущих значений координат системы и заданных конечных целей $\Phi_{з\,m}$. Перечисленные характеристики будем объединять в векторный показатель эффективности функционирования системы. Эффективность системы может быть повышена, по крайней мере, в какой-либо части компонент векторного показателя для одного или нескольких вариантов параметров μ_m режимов функционирования.

Первые образцы системы создаются на основе применения известных, но малоэффективных принципов работы и упрощенных представлений о физических процессах, определяющих функционирование системы.

На более ранних этапах эволюции динамическая система, как правило, декомпозируется на слабо зависимые подсистемы, которые могут разрабатываться независимо. Слабая взаимосвязь обеспечивается выбором проектных параметров. Часть подсистем становятся вспомогательными, выпадают из рассмотрения главной задачи, вытекающей из основного назначения объекта.

В процессе эволюции осуществляется обратный процесс. Совершенствование характеристик динамической системы связано с привлечением более сложных моделей ее функционирования. Уравнения объекта, которые использовались при проектировании прототипа изделия, для модернизированного варианта дополняются новыми уравнениями, более детально описывающими функционирование отдельных частей системы или раскрывающими физическую суть процессов, лежащих в основе нововведений. При этом расширяется пространство фазовых координат системы, и дополнительные уравнения становятся составными частями модели функционирования нового изделия.

Сравнение технических решений по критериям эффективности (4) и (5) представляет собой сложную проблему.

Попытаемся сформулировать основные принципы эволюции системы в процессе совершенствования ее характеристик, анализируя ее возможности реализовывать то или иное множество движений, опираясь на вид правых частей уравнений системы [10].

В частности, в правой части уравнения (1) могут изменяться неявно заданные проектные параметры, определяющие эффективность воздействия управления на регулируемые координаты. Более того, в новой системе могут создаваться новые каналы управления или активизироваться уже имеющиеся. Благодаря использованию взаимосвязей в объекте между различными подсистемами могут активизироваться резервы функциональных возможностей, позволяющие расширить множество режимов (возмущенных и нештатных) функционирования параметров $\mu_m \in \mathrm{M}_m$ с приемлемым качеством управления. Как уже отмечалось, в результате использования более сложных моделей функционирования увеличиваются размерности k_m и ν_m пространств E^{k_m}, E^{ν_m}, в которых определяются фазовые координаты $x_m(t)$ и управляющие воздействия $w_m(t)$. Характеристики системы могут совершенствоваться также благодаря расширению области, ограничивающей значения управляющих воздействий $w_m(t) \in W_m$. Описанные выше факторы определяют множество движений системы — множество значений векторов скоростей изменения фазовых координат $x_m(t)$ при всех возможных значениях μ_m и $w_m(t)$:

$$F_m(x_m(t)) = \{f_m | f_m = f_m(x_m(t),\ \mu_m,\ w_m(t),\ t),\\ w_m(t) \in W_m,\ \mu_m \in \mathrm{M}_m\}.$$

Данное множество рассматривается при всех значениях $x_m(t) \in X_m$.

Будем полагать, что в новой, более совершенной системе расширяются (или, по крайней мере, сохраняются) области X_{0m} и X_m допустимых начальных и текущих значений координат.

Рассмотрим варианты построения системы на m-ом и $(m - 1)$-м этапах.

Пусть $x_{m-1} = (x^1_{m-1}, x^2_{m-1}, ..., x^{k_{m-1}}_{m-1})$, $f_{m-1} = (f^1_{m-1}, f^2_{m-1}, ..., f^{k_{m-1}}_{m-1})$.

На m-м этапе эволюции будем рассматривать более сложную по сравнению с $(m - 1)$-ым этапом модель функционирования системы, включающую в себя дополнительные уравнения, приближающие модель к реальной системе. Вектор координат состояния и вектор-функция правой части уравнения системы на m-м этапе дополняются новыми компонентами:

$$x_m = (x^1_m, x^2_m, ..., x^{k_{m-1}}_m, x^{k_{m-1}+1}_m, ..., x^{k_m}_m),$$

$$f_m = (f^1_m, f^2_m, ..., f^{k_{m-1}}_m, f^{k_{m-1}+1}_m, ..., f^{k_m}_m).$$

Очевидно, что использование при проектировании более полного априорного описания, более адекватного реальной системе, уменьшает методические ошибки управления, что позволяет в итоге улучшить показатели качества (4) и (5).

В уравнении новой системы выделим векторы координат

$$x_m = (x_{m1}, x_{m2}),$$

$$x_{m1} = (x^1_m, x^2_m, ..., x^{k_{m-1}}_m),\ x_{m2} = (x^{k_{m-1}+1}_m, ..., x^{k_m}_m),$$

$$x_{m1}(t) \in X_{m1}, \quad x_{m2}(t) \in X_{m2}$$

и вектор-функции

$$f_{m1} = (f^1_m, f^2_m, ..., f^{k_{m-1}}_m),\ f_{m2} = (f^{k_{m-1}+1}_m, ..., f^{k_m}_m),$$

$$f_m = (f_{m1}, f_{m2}).$$

Вектор x_{m1} включает в себя те же координаты, что и вектор x_{m-1} в уравнениях прототипа, при этом $X_{0(m-1)} \subseteq X_{0m1}$, $X_{m-1} \subseteq X_{m1}$.

Зафиксируем значение вектора дополнительных координат $x_{m2}(t) = x^*$ и определим вектор-функцию $f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t) = f_{m1}(x_{m1}(t), x_{m2}(t) = x^*, \mu_m, w_m(t), t)$.

Тогда $f_{m1}(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t) = f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t) + \Delta f_{m1}(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t)$, а вектор-функция f_m может быть представлена в виде:

$$f_m = (f_{m0}, 0, ..., 0) + \Delta f_m, \text{ где } \Delta f_m = (\Delta f_{m1}, f_{m2}), \quad (6)$$

где число нулей определяется размерностью вектора $x_{m2}(t)$.

Данное представление вектор-функции f_m выделяет в ней две составляющие.

Первое слагаемое характеризует движение новой системы по ограниченному вектору фазовых координат x_{m1}, включающему в себя те же координаты, что и вектор x_{m-1} в уравнениях прототипа, при фиксированном $x_{m2}(t) = x^*$. С помощью вектор-функции f_{m0} попытаемся учесть преемственность и взаимосвязь между старым и новым вариантом системы. Второе слагаемое в выражении (6) учитывает изменение динамики движения системы из-за присутствия в ее описании новых дополнительных уравнений. Таким образом, описание системы на $(m - 1)$-м этапе содержит методическую ошибку Δf_{m1}. Уменьшение методической ошибки до приемлемого уровня достигается путем введения более жестких ограничений на координаты состояния и управление, что приводит к снижению функциональных возможностей системы и показателей качества (4).

Определим множества значений векторов скоростей изменения фазовых координат $x_{m-1}(t)$, $x_{m1}(t)$ при всех возможных значениях μ_{m-1}, $w_{m-1}(t)$ и μ_m, $w_m(t)$:

$$F_{m-1}(x_{m-1}(t)) = \{f_{m-1} | f_{m-1} = f_{m-1}(x_{m-1}(t), \mu_{m-1}, w_{m-1}(t), t), w_{m-1}(t) \in W_{m-1}, \mu_{m-1} \in \mathrm{M}_{m-1}\},$$

$$F_{m0}(x_{m1}(t)) = \{f_{m0} | f_{m0} = f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t), w_m(t) \in W_m, \mu_m \in \mathrm{M}_m\}.$$

Будем полагать, что функция $f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t)$ может воспроизводить часть значений или все значения $f_{m-1} \in F_{m-1}(x_{m-1}(t))$ при $x_{m-1}(t) = x_{m1}(t)$. При этом множество $F_{m0}(x_{m1}(t))$ может полностью включать в себя множество $F_{m-1}(x_{m-1}(t))$. Это означает, что новая система способна реализовать любое движение прототипа. Очевидно, что такая система заведомо не хуже ее прототипа в смысле показателей (4) и (5). Кроме того, таким образом сохраняется преемственность и взаимосвязь новой системы со старой.

Отметим, что часть элементов множества $F_{m-1}(x_{m-1}(t))$, явно неэффективных в смысле показателей качества (4) и (5) функционирования системы, нецелесообразно воспроизводить в новом прототипе и включать в множество $F_{m0}(x_{m1}(t))$.

Новые движения, не входящие в множество $F_{m-1}(x_{m-1}(t))$, создаются благодаря нововведениям в техническое решение.

Механизм влияния технического решения и вида соответствующей ему правой части уравнений на компоненты векторного показателя эффективности системы не рассматривается в связи с его сложностью (оценка эффективности требует решения задачи оптимального управления). Предполагается, что расширение множества $F_{m0}(x_{m1}(t))$ благодаря новым движениям придает системе новые полезные свойства. Здесь имеется в виду, что формирование движения системы на всем участке работы из расширенного множества $F_{m0}(x_{m1}(t))$, включающего в себя новые движения, позволяет улучшить векторный показатель эффективности системы в части его отдельных компонентов. Другим полезным свойством системы может быть расширение множества возмущенных и нештатных режимов, в которых достигается, по крайней мере, одна из заданных целей управления $\varphi_{з\,m} \in \Phi_{з\,m}$ с приемлемыми показателями качества (4) и (5).

Пусть:

$F_{m0}^{past}(x_{m1}(t))$ — подмножество множества $F_{m-1}(x_{m-1}(t))$, полностью входящее в $F_{m0}(x_{m1}(t), t)$ при $x_{m1}(t) = x_{m-1}(t) \in X_{m-1}$;

$F_{m0}^{new}(x_{m1}(t))$ — множество новых значений $f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t) \notin F_{m0}^{past}(x_{m1}(t))$.

С учетом изложенного можно записать:

$$F_{m0}(x_{m1}(t)) = F_{m0}^{new}(x_{m1}(t)) \cup F_{m0}^{past}(x_{m1}(t)) \quad \text{для любых } x_{m1}(t) \in X_{m-1}. \tag{7}$$

Для значений $x_{m1}(t) \in X_{m1}$, выходящих за границы области X_{m-1}, будем полагать, что множество $F_{m0}(x_{m1}(t))$ содержит только новые движения.

Определим множество

$$F_m(x_m(t)) = \{f_m | f_m = (f_{m0}, 0, ..., 0) + + \Delta f_m(x_m(t), w_m(t), \mu_m), w_m(t) \in W_m, \mu_m \in \mathrm{M}_m\}, \tag{8}$$

$$f_{m0} \in F_{m0}(x_{m1}(t), t), \quad x_{m1}(t) \in X_{m1}, \quad x_m(t) \in X_m.$$

Подытожим вышеизложенное. Сформулируем правило формирования множества $F_m(x_m(t))$ движений новой системы, при которых сохраняется ее преемственность и взаимосвязь с прототипом. На основе движений старого прототипа путем исключения малоэффективных элементов и дополнения новыми движениями, расширяющими функциональные возможности системы, образуется множество $F_{m0}(x_{m1}(t), t)$ движений новой системы по неполному вектору координат состояния $x_{m1}(t) \in X_{m1}$ при фиксированном значении дополнительных координат $x_{m2}(t)$. Далее множество $F_{m0}(x_{m1}(t), t)$ преобразуется в множество $F_m(x_m(t), t)$ в соответствии с выражениями (6) и (8). При этом преобразовании учитывается расширение пространства состояний $x_m(t)$ новой системы по сравнению с пространством состояний $x_{m1}(t)$.

В качестве примера рассмотрим систему управления движением центра масс жидкостной ракеты-носителя (РН) при выведении ее на околоземную орбиту. Воспользуемся упрощенным уравнением движения РН как материальной точки в продольной плоскости (плоскости стрельбы):

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{1}{m_{\text{РН}}}(P\cos\theta - g_x(x, y) - X_x(x, y) + P_{xu}),$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \frac{1}{m_{\text{РН}}}(P\sin\theta - g_y(x, y) - X_y(x, y) + P_{yu}),$$

$$\frac{dx}{dt} = V_x, \quad \frac{dy}{dt} = V_y, \ \dot m_{\text{РН}} = \dot m_{\text{дв в}} + \Delta \dot m_{\text{дв}},$$

$$P = W_{\text{ист}} \dot m_{\text{РН}}, \quad t \in [0, T],$$

где V_x и V_y — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости; x и y — текущие горизонтальная и вертикальная координаты; P — тяга маршевого двигателя, регулируемая путем отклонения $\Delta \dot m_{\text{дв}}$ секундного расхода топлива через двигатель $\dot m_{\text{дв}}$ при постоянной скорости истечения $W_{\text{ист}}$; g_x и g_y — составляющие ускорения силы притяжения; X_x и X_y — составляющие аэродинамической силы; P_{xu} и P_{yu} — составляющие тяги управляющих двигателей; $m_{\text{РН}}$ — текущая масса РН; θ — угол тангажа; T — терминальный момент времени.

Применительно к данному примеру вектор управляющих воздействий и вектор-функция правой части уравнения (1) определяются как

$$W_m = (\theta, \Delta \dot m_{\text{дв}}, P_{xu}, P_{yu}),$$

$$f_m = \left(\frac{1}{m_{\text{РН}}}(P\cos\theta - g_x(x, y) - X_x(x, y) + P_{xu}\right),$$

$$\frac{1}{m_{\text{РН}}}(P\sin\theta - g_y(x, y) - X_y(x, y) + P_{yu}),$$

$$V_x, \ V_y, \ \dot m_{\text{дв}} + \Delta \dot m_{\text{дв}}).$$

Режимы функционирования системы, задаваемые вектором μ_m, здесь не рассматриваются. Предполагается, что на управление и отклонения координат системы x, y, V_x, V_y от заданной номинальной траектории наложены ограничения.

Терминальный показатель точности управления (4) определяется как функция невязок краевых условий по координатам x, y, V_x, V_y в момент времени T.

В показателе интегрального типа (5) подынтегральная функция задается в виде $\sqrt{\left(\frac{dV_x}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dt}\right)^2}$.

Представленные уравнения движения центра масс РН используются в современных системах терминального управления выведением. Такие системы позволяют формировать гибкие, оптимальные по энергетике траектории движения РН, обеспечивающие заданные конечные значения кинематических параметров или некоторых функций этих параметров в широком диапазоне начальных и возмущенных условий. Прототипом современной системы служат система управления выведением, реализующая контур программного управления углом тангажа $\theta_{прог}$, обеспечивающий заданную траекторию движения в номинальных условиях, и контур управления P_{xu}, P_{yu} с обратной связью, предназначенный для компенсации воздействия возмущающих факторов ($W_m = \theta_{прог}$, $\Delta\dot{m}_{дв}$, P_{xu}, P_{yu}). Такая система обеспечивает решение задачи выведения в сравнительно узкой области отклонений координат состояния x, y, V_x, V_y от номинальных значений, соответствующих заданной траектории движения. В этом случае существенно упрощаются уравнения движения РН путем линеаризации функций правых частей относительно номинальной траектории. Кроме того, при формировании текущего управления отпадает необходимость привлечения довольно сложных моделей формального описания аэродинамических, гравитационных сил и тяги двигателя в зависимости от высоты и скорости полета. Описанная система управления выведением отличается простотой алгоритма управления, не требующего для своей организации бортовой ЦВМ. Вместе с тем, в процессе проектирования и отработки данной системы был решен ряд принципиальных вопросов, связанных с разработкой гиростабилизированной платформы, акселерометров, с управлением тягой двигателя и др.

Повышение эффективности решения задач выведения в современной системе управления обеспечивается благодаря введению дополнительного канала управления угла тангажа θ относительно $\theta_{прог}$. В результате существенно расширяются область векторного управления W_m и множество движений (значений вектор-функции правой части f_m уравнения объекта), которое включает в себя множество движений прототипа (линеаризованной системы). В этом случае появляется возможность выбора оптимального по энергетике векторного управления W_m. В ряде задач выведения РН существенный выигрыш в энергетике обеспечивает стратегия управления с максимальным расходом топлива $\Delta\dot{m}_{дв}$ и, соответственно, максимальной тягой двигателя, а также с отклонениями угла тангажа θ относительно $\theta_{прог}$ в виде линейной функции времени.

2. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАЖДОЙ ЕЕ НОВОЙ ВЕРСИИ

Пусть процесс совершенствования характеристик СТС заканчивается на M-этапе, на котором определяется окончательный вариант построения системы. В этом варианте в техническом решении интегрированы наиболее рациональные нововведения, эффективность которых анализировалась в итерационном процессе совершенствования характеристик СТС.

Рассмотрим, каким образом изложенные выше правила формирования итераций в процессе эволюции позволяют сохранять требуемый уровень надежности системы. Возможность снижения надежности возникает в связи с тем, что при практической реализации нового технического решения не удается воплотить его в идеальном виде, и функционирование СТС может существенно отличаться от задуманного.

Формально это явление выражается в виде отличия фактически реализованной вектор-функции $\hat{f}_m(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t)$ и слагаемых ее разложения $\hat{f}_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t)$, $\Delta\hat{f}_m$ в соответствии с выражением (6) от желаемых проектных из-за присутствия неопределенных факторов в описании новой системы.

Если неопределенность в описании функционирования СТС не разрешается в процессе совершенствования системы, она накапливается.

Пусть $\delta f_m = \hat{f}_m(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t) - f_m(x_m(t), \mu_m, w_m(t), t)$,

$$\delta f_{m0} = \hat{f}_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t) - \\ - f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t),$$

$$\delta\Delta f_m = \Delta\hat{f}_m - \Delta f_m,$$

$$\delta f_m = (\delta f_{m0}, 0, ..., 0) + \delta\Delta f_m.$$

Будем рассматривать значения δf_m такого уровня, при котором потери качества неприемлемы для дальнейшего применения системы, т. е. когда система оказывается неработоспособной. При этом вышесказанное справедливо независимо от того, в каком слагаемом $\hat{f}_{m0}$ или $\Delta\hat{f}_m$ (разложения (6) правой части уравнения системы) возникает недопустимая ошибка.

Перейдем к анализу причин возникновения ошибок δf_{m0} и $\delta\Delta f_m$ на множестве движений системы $F_m(x_m(t), t)$, $x_m(t) \in X_m$.

Для каждого значения вектора координат состояния $x_m = (x_{m1}, x_{m2})$ ошибка δf_{m0} возникает на множестве движений системы $f_{m0} \in F_{m0}(x_{m1}(t))$ по неполному вектору координат состояния $x_{m1}(t) \in X_{m1}$ при $x_{m2}(t) = x^*$, а ошибка $\delta\Delta f_m$ — на множестве движений системы $f_m \in F_m(x_m(t))$, $x_m(t) \in X_m$.

Проанализируем ошибку δf_{m0}. Воспользуемся выражением (7). В подмножестве $f_{m0} \in F_{m0}^{past}(x_{m1}(t))$, $x_{m1}(t) \in X_{m-1}$, ошибка δf_{m0} вызывается причинами, присущими старой системе. Если старая система подвергалась испытаниям и дорабатывалась, то причинами возникновения ошибки δf_{m0} служат аппаратные отказы и погрешности отработки старой системы.

В подмножестве $f_{m0} \in F_{m0}^{new}(x_{m1}(t))$, $x_{m1}(t) \in X_{m-1}$ ошибка, δf_{m0} связана с неопределенностью отдельных факторов описания системы, влияющих на вид и значения параметров вектор-функции f_{m0}. Для $f_{m0} \in F_{m0}(x_{m1}(t))$, $x_{m1}(t) \in (X_{m1} \backslash X_{m-1})$, источником ошибки δf_{m0} также служат неопределенные факторы.

Способы формального учета неполноты априорного описания системы рассматривались в работе [11]. Показано что, влияние неопределенных факторов может быть сведено к зависимости значений вектор-функции, $f_{m0}(x_{m1}(t), \mu_m, w_m(t), t)$ от вектора параметров V_{m1}, которые могут существенно отличаться при проектном задании и реальном функционировании системы.

Возможность таких ситуаций будем характеризовать априорной вероятностью. Отметим, что в данном случае говорить о вероятности можно лишь весьма условно.

Будем полагать, что значения вектор-функции Δf_m зависят от вектора неопределенных параметров V_{m2}. Ошибки в задании значений V_{m2} вызывают отклонения $\delta\Delta f_m$.

В рассмотренном выше примере системы управления движением центра масс РН при переходе к современным терминальным принципам управления неопределенные факторы в математическом описании движения объекта связаны с усложнением моделей формального описания аэродинамических, гравитационных сил и тяги двигателя в зависимости от высоты и скорости полета.

Пусть $V_m = (V_{m1}, V_{m2})$. Надежность системы будем характеризовать вероятностью

$$P_m = P(\delta f_{m0} = 0,\ \delta\Delta f_m = 0) \qquad (9)$$

ее исправного состояния на множестве движений $F_m(x_m(t))$ для всех $x_m(t) \in X_m$, $x_m = (x_{m1}, x_{m2})$.

С учетом проведенного выше анализа причин возникновения ошибок δf_{m0} и $\delta\Delta f_m$ надежность (9) можно выразить совместной вероятностью событий:

$$\delta f_{m0} = 0,\ f_{m0} \in F_{m0}^{past}(x_{m1}(t)),\quad x_{m1}(t) \in X_{m-1},$$

$$\delta f_{m0} = 0,\ f_{m0} \in F_{m0}^{new}(x_{m1}(t)),\quad x_{m1}(t) \in X_{m-1},$$

$$\delta f_{m0} = 0,\ f_{m0} \in F_{m0}(x_{m1}(t)),\quad x_{m1}(t) \in (X_{m1} \backslash X_{m-1}),$$

$$\delta\Delta f_m = 0,\ f_m \in F_m(x_m(t)),\quad x_m(t) \in X_m.$$

Вероятность первого из них практически определяется вероятностью $P_{m-1} = P(\delta f_{m-1} = 0)$ исправного состояния старой системы.

Остальные события связаны с неопределенными факторами. Совместная вероятность этих событий может быть определена как вероятность отсутствия отклонений ($\delta V_m = 0$) вектора параметров V_m. При условии независимости неопределенных факторов вероятность $P(\delta V_m = 0)$ представляется в виде:

$$P(\delta V_m = 0) = \prod_{n=1}^{N_m} P(\delta V_{mn} = 0),$$

где N_m — размерность вектора V_m.

В итоге можно записать, что

$$P_m = \prod_{n=1}^{N_m} P(\delta V_{mn} = 0) H_m P_{m-1}, \qquad (10)$$

где H_m — вероятность отсутствия отказов в дополнительной аппаратуре из-за нововведений в системе.

Полученное соотношение представляет собой разностное уравнение, определяющее изменение показателя надежности в эволюционном процессе совершенствования характеристик динамической системы. Из уравнения (10) следует, что при отсутствии контрольных операций и отработки новой системы ее надежность вследствие умножения вероятностей, связанных с нововведениями, падает с ростом m.

Если система на каждом этапе эволюции подвергается испытаниям и дорабатывается, то в уравнении (10) вероятность P_{m-1} исправного состояния старой системы определяется аппаратными отказами и погрешностями ее отработки. Основная цель испытаний новой системы заключается в выявлении ошибок, связанных с неопределенными факторами.

В уравнении (10) возникновение ошибок из-за неопределенных факторов учитывается вероятностью

$$P_{\text{н.ф}} = \prod_{n=1}^{N_m} P(\delta V_{mn} = 0).$$

Рассмотрим, как изменится вероятность $P_{\text{н.ф}}$ после проведения испытаний системы в заданных режимах функционирования, диагностики нарушений в ее работе и доработки системы по устранению выявленных дефектов.

Система может испытываться в различных режимах ее функционирования, определяемых параметрами μ_m и управлением w_m. На практике реализуется ограниченное число режимов испытаний, с помощью которых должны быть проверены все нововведения данного эволюционного этапа разработки системы.

После проведения испытаний на основе измерений координат системы оцениваются значения неизвестных параметров V_m. (Здесь не рассматривается возможность повторной оценки параметров V_{m-1} $(m-1)$-го этапа на m-м этапе эволюции).

По совокупности проведенных испытаний должны быть проверены значения всех параметров V_m. При этом система может быть исправной $(\delta V_m = 0)$ или неисправной.

Возможные варианты неисправностей определяются всеми возможными сочетаниями отклонений $\delta V_{mj} > 0$, $j = 1, 2, ..., J$, параметров V_{mj}, входящих в вектор V_m.

Пусть s_j, $j = 0, 1, 2, ..., J$, — состояния системы с отклонениями параметров V_{mj}, при этом отклонения остальных параметров вектора V_m равны нулю; s_0 — исправное состояние.

Будем считать известными правила оценки состояния (диагностики) системы по результатам измерений фазовых координат в процессе испытаний. Каждой оценке состояния системы $\hat{s}_j$ соответствует заданная область значений измерений. Тогда вероятность того, что система находится в состоянии s_i при условии диагностики состояния $\hat{s}_j$ по результатам испытаний, определяется как

$$P(s_i/\hat{s}_j) = \frac{P(s_i/s_j) \times P(s_j)}{P(\hat{s}_j)},$$
$$j,\ i = 0, 1, 2, ..., J, \qquad (11)$$

где $P(\hat{s}_j) = \sum_{i=0}^{J} P(\hat{s}_j/s_i)P(s_i)$, $P(s_j)$ — априорная вероятность состояния s_j, $P(s_0) = P_{\text{н.ф}}$, $P(\hat{s}_j/s_j)$, $P(\hat{s}_j/s_i)$, $j \neq i$, j, $i = 0, 1, 2, ..., J$, — соответственно вероятности правильного и ошибочного принятия решения определяются погрешностями контроля и принятия диагностических решений.

Будем полагать, что по результатам диагностики выполняются следующие операции. Если система считается исправной, то она не дорабатывается и принимается для дальнейшей эксплуатации. При диагностике неисправного состояния система дорабатывается. После доработки система считается исправной. Предполагается, что при ошибочной диагностике доработанная система оказывается неисправной.

Поскольку существуют ошибки технологических операций по доработке системы, будем учитывать вероятность P_{isp} их правильного выполнения.

В итоге вероятность исправного состояния системы определяется как отношение вероятности ее исправности в ситуациях $\hat{s}_j$, $j = 1, ..., J$, в которых система диагностируется как исправная или доводится до исправного состояния, к вероятности этих ситуаций. С учетом сделанных замечаний вероятность исправного состояния системы после проведения испытаний, диагностики неисправностей и доработки определяется выражением

$$\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0) = P(s_0/\hat{s}_0)P(\hat{s}_0) + \sum_{j=1}^{J} P(s_j/\hat{s}_j)P_{isp}P(\hat{s}_j),$$

$$\sum_{j=0}^{J} P(\hat{s}_j) = 1.$$

Допустим, что вероятность правильной диагностики неисправного состояния системы не зависит от вида состояния. Из выражения (11) определим средневзвешенные вероятности ошибочной диагностики исправного и неисправных состояний системы. Допустим, что средневзвешенные вероятности одинаковы для всех неисправных состояний.

Введем обозначения: $P_{diag\ isp}$ — вероятность правильной диагностики исправного состояния;

$\bar{P}_{diag\ isp}$ — средневзвешенная вероятность неправильной диагностики исправного состояния (за исправную принимается неисправная система); $P_{diag\ nisp}$ — вероятность правильной диагностики неисправного состояния; $\bar{P}_{diag\ nisp}$ — средневзвешенная вероятность неправильной диагностики неисправного состояния (за неисправное состояние данного типа принимается исправное состояние либо неисправное состояние другого типа).

С учетом сделанных допущений можно записать:

$$\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0) = \\ = P_{diag\ isp}P(s_0) + P_{diag\ nisp}(1 - P(s_0))P_{isp}, \quad (12)$$

$$P_{diag\ isp}P(s_0) + \bar{P}_{diag\ isp}(1 - P(s_0)) + P_{diag\ nisp}(1 - P(s_0)) + \\ + \bar{P}_{diag\ nisp}\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=0,\, i\neq j}^{J}P(s_i) = 1, \quad (13)$$

где $\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=0,\, i\neq j}^{J}P(s_i) = J - 1 + P(s_0)$.

Примем, что $P_{diag\ isp} = P_{diag\ nisp}$, $\bar{P}_{diag\ isp} = \bar{P}_{diag\ nisp}$ и введем параметр, характеризующий качество контроля и диагностики $q = \dfrac{\bar{P}_{diag\ isp}}{P_{diag\ isp}}$, тогда из выражения (13) следует $P_{diag\ isp} = \dfrac{1}{1 + qJ}$.

Подставляя данное выражение в формулу (12), найдем

$$\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0) = \frac{P(s_0)(1 - P_{isp}) + P_{isp}}{1 + qJ}. \quad (14)$$

Полученное упрощенное соотношение характеризует эффективность раскрытия неопределенности в описании системы с нововведениями в результате проведения испытаний, диагностики и доработки. Из соотношения (14) вытекают некоторые очевидные выводы.

Вероятность $\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0)$ тем больше, чем выше вероятность P_{isp}, характеризующая качество доработки системы, и чем меньше параметр q, т. е. выше качество контроля и диагностики. Значение J определяется числом неопределенных факторов в описании системы на данном этапе эволюции. Из соотношения (14) может быть выбрано ограничение на допустимое число таких факторов. При принятых правилах отработки системы, когда ставится задача каждое диагностируемое неисправное состояние довести до исправного, вероятность $\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0)$ не зависит от априорной вероятности $\hat{P}_{\text{н.ф}}(\delta f_m = 0) = P(s_0)$.

В итоге, подставляя соотношение (14) в уравнение (10), получим следующее уравнение, определяющее надежность системы в процессе эволюции:

$$P_m = \frac{P(s_0)(1 - P_{isp}) + P_{isp}}{1 + qJ} \times H_m P_{m-1}.$$

Итак, рассмотрен эволюционный процесс совершенствования характеристик динамической системы на основе выбора множества движений, определяемого правой частью уравнения. Благодаря преемственности технических решений и поэтапному контролю функционирования каждой новой версии, удается сохранить требуемый уровень надежности системы.

Принимая во внимание эффективность эволюционного принципа для сохранения надежности сложной системы, в прогностическом плане представляет интерес рассмотреть возможность его применения в технологии создания каждого конкретного образца изделия. Здесь имеется в виду, что каждый образец изделия будет изготавливаться и развиваться эволюционным путем, поэтапно совершенствуя свои свойства и характеристики, переходя от сравнительно простых, примитивных к более сложным и совершенным версиям изделия. На основе поэтапного контроля система будет адаптироваться к неопределенным факторам, возникающим в процессе развития и проявляющимся в условиях реального функционирования.

Это позволит перейти от существующей жесткой программы создания сложной системы и стремления выпускать изделия-близнецы к гибким технологиям и выпуску образцов систем, обладающих индивидуальными характеристиками. Индивидуальность технологии изготовления и развития каждого образца изделия определяется вероятностным характером технологических операций и условий функционирования. Стремление производить все образцы изделия по единому стандарту требует от производителя дополнительных усилий и затрат ресурсов для парирования влияния случайных факторов на характеристики качества системы. От принципа «качество через силу», лежащего в основе этой стратегии, необходимо перейти к принципу «качество через гибкость и адаптивность».

Возможность материального воплощения технологий поэтапного изготовления в производстве сложных технических систем можно связать с достижениями биотехнологии и в разработке материалов с заданными свойствами, с тенденцией микроминиатюризации технологии, развитием принципов построения 3D моделей изготавливаемого изделия.

Наиболее очевидна возможность технологии поэтапного изготовления в производстве алгоритмов управления и программного обеспечения сложных динамических систем.

Современная технология составления вычислительной процедуры алгоритмов управления интегрированных бортовых систем ракет-носителей напоминает сборку технического изделия из отдельных узлов и деталей. Элементами сборки в случае составления алгоритма служат математические операции. Идея заключается в том, чтобы в процессе создания разрабатывались и экспериментально проверялись промежуточные, упрощенные версии алгоритма управления, которые последовательно приближались бы к окончательному облику. Экспериментом в данном случае является имитационное моделирование бортового вычислительного комплекса совместно с математической моделью объекта и такими элементами аппаратного состава, как датчики и исполнительные органы в натурном виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практика создания сложных технических систем свидетельствует о том, что такие системы изготавливаются неодномоментно, а проходят эволюционный путь проб и ошибок от сравнительно простых к более сложным и совершенным образцам изделия. В настоящей статье изложен один из возможных вариантов формализации этого процесса, основанный на сравнительно простых правилах преобразования уравнений системы, при которых расширяются ее функциональные возможности и сохраняется преемственность с прототипом. Для оценки надежности получено разностное уравнение изменения вероятности исправного состояния системы при поэтапном проведении испытаний, диагностики неисправностей и доработки ее образцов, подтверждающее эффективность эволюционного принципа для сохранения надежности сложной системы. В прогностическом плане представляет интерес рассмотреть возможность перехода к гибкой технологии поэтапного изготовления каждого конкретного образца изделия с индивидуальными характеристиками. Такого рода индивидуальное производство, совмещая технологические и контрольные операции, будет способно адаптироваться к вероятностному характеру технологических операций и условий функционирования. Как следует из изложенного, в создании гибких технологий определенное место занимают вопросы, относящиеся к области управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.П., Портнов-Соколов Ю.П.* Вопросы создания сложных технических объектов с позиции их безопасности (на примере объектов ракетно-космической техники) // Надежность и контроль качества. — 1998. — № 1. — С. 24—35.
2. *Tedeman Lars G.* Safety aproach for ESA spase programs // Spase Technol. — 1990. — Vol. 10, N 3. — P. 167—173.
3. *Недайвода А.К.* Теоретические основы натурной отработки ракет-носителей. — СПб.: Политехника, 1996.
4. *Мартино Д.* Технологическое прогнозирование. — М.: Прогресс, 1977.
5. *Ichiro Ido.* Towards a breakthroach for plant management and control systems // 13 th World Congress of IFAC. Preprints. 1996. Plenary V. — P. 19—24.
6. *Scholtes P.* Total quality or performance appraisal: choose one // Nation Prod Rev. — 1993. — Vol. 12, N 3. — P. 349—363.
7. *Чадеев В.М.* Принципы исследования иерархии при автоматизации технологических процессов. Тр. ИПУ РАН — 2000. — Т. VIII. — С. 22—45.
8. *Терминальное* управление наведением ракеты-носителя и расходованием топлива в режиме его полной выработки / В.П. Иванов, В.К. Завадский, А.Д. Гуськов и др. // Междунар. науч.-техн. конф. «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами», посвящ. 100-летию со дня рождения академика РАН Николая Алексеевича Пилюгина. Ч. II: Материалы пленар. засед. (докл. и сообщ.) / МИРЭА, 23 апр. 2008 г. — М., 2008. — С. 56—65.
9. *Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г.* Интеграция бортовых систем управления для повышения энергетических и надежностных характеристик средств выведения // Материалы III всерос. науч.-техн. конф. «Актуал. пробл. ракетно-космической техники»: III Козловские чтения, 16—20 сент. 2013 г., г. Самара) / СамНЦ РАН. — Самара, 2013. — С. 122—126.
10. *Краснощеков П.С., Федоров В.В., Флеров Ю.А.* Элементы математической теории принятия проектных решений // Автоматизация проектирования. — 1997. — № 1. — С. 15—23.
11. *Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г.* Методы и способы формального учета неполноты информации в исходных данных на проектирование бортовых систем терминального управления // Проблемы управления. — 2010. — № 6. — С. 71—77.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским.

Иванов Владимир Петрович — д-р техн. наук, зав. лабораторией,

Каблова Елена Борисовна — науч. сотрудник,

Кленовая Людмила Григорьевна — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vladguc@ipu.ru.