

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 519.876.2:62–50(047)

А.С. Кулик

РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ АВТОНОМНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. Часть 1

Введение

В настоящее время наблюдается возрастающее негативное влияние техносферы на процессы в биосфере. Это обусловило появление в области аэрокосмической техники тенденции роста потребительских требований к долговременному и безаварийному функционированию автономных летательных аппаратов, решающих задачи мониторинга, ретрансляции, транспортировки грузов и ряд других.

Новые потребительские требования входят в противоречие с априорными и апостериорными неопределенностями условий функционирования летательных аппаратов как объектов автоматического управления. Неопределенность условий связана с необходимостью учета неконтролируемого влияния на процессы функционирования летательных аппаратов различного рода возмущений, разнообразных шумов, а также неизбежных сбоев, поломок, неисправности, в общем, отказов. Все эти воздействия, по сути, дестабилизирующие работоспособность автономных летательных аппаратов, представляют собой неопределенные события.

Накопленный арсенал принципов, моделей и методов в классе адаптивных систем управления позволяет в значительной мере конструктивно разрешить частично это противоречие с использованием ряда правдоподобных гипотез об условиях функционирования [1–7]. Попытки использования известных инструментальных средств для более полного разрешения этого противоречия приводят к необходимости поиска новых подходов к управлению автономными летательными аппаратами при неопределенности полного множества неизбежных дестабилизирующих воздействий на всех этапах жизненного цикла.

Одним из продуктивных представляется подход, базирующийся на адаптации посредством диагностирования причин дестабилизации объектов автоматического управления и восстановления их работоспособности по диагнозу [8].

Совершенствование функций диагностирования и восстановления работоспособности объектов автоматического управления возможно посредством использования инструментальных средств знание-ориентированных систем продукционного типа [9, 10]. Продукционные знание-ориентированные средства позволяют конструктивно совершенствовать функции диагностирования и восстановления в течение всего жизненного цикла летательных аппаратов посредством новых экспериментальных и экспертных знаний о появляющихся де-

© А.С. КУЛИК, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 3*

стабилизирующих воздействиях, т.е. обеспечивать эффективный процесс обучения в целях рационального повышения качества функционирования автономных летательных аппаратов.

В статье представлены результаты исследований по разработке подхода к формированию рационального управления работоспособностью автономных летательных аппаратов.

1. Основные положения рационального управления

1. Событийная неопределенность дестабилизирующих воздействий на автономные летательные аппараты порождает множество неработоспособных состояний и обуславливает необходимость рационального управления работоспособностью.

2. Рациональное управление работоспособностью автономных летательных аппаратов формируется на единой методологической основе обеспечения работоспособности на всех этапах жизненного цикла.

3. Рациональное управление формируется в результате разумного сочетания аналитических средств, макетных и стендовых экспериментальных исследований, текущих опытных данных, интуиции и здравого смысла разработчиков.

4. Рациональное управление работоспособностью возможно только на основе знания причин нештатных ситуаций, т.е. дестабилизирующих воздействий. Дестабилизирующие воздействия не могут быть непосредственно измерены. Косвенные измерения их последствий приводят к необходимости решения обратных задач — диагностических. Поэтому рациональное управление базируется на диагнозе устранимых причин однократных дестабилизирующих воздействий, т.е. на принципе управления по диагнозу.

5. Множество возможных состояний объекта рационального управления, порождаемых дестабилизирующими воздействиями $d_i \in D, i = \overline{1, q}$, обуславливает необходимость формирования множества избыточных ресурсов R , позволяющих восстанавливать работоспособность. Поэтому рациональное управление базируется на событийном выборе и продуктивном использовании избыточных ресурсов.

6. Сложность, многосвязность, многомерность, гетерогенность и уникальность современных и перспективных автономных летательных аппаратов приводят к декомпозиции проблемы рационального управления на три последовательно взаимосвязанные задачи:

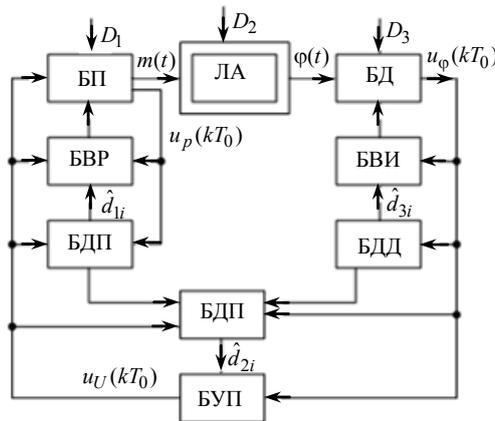


Рис. 1

а) рациональное управление работоспособностью блока приводов (БП);

б) рациональное управление работоспособностью блока датчиков (БД);

в) рациональное управление работоспособностью летательного аппарата (ЛА).

Такой подход порождает, например, применительно к задаче угловой ориентации и стабилизации ЛА блок-схему, представленную на рис. 1.

В блок-схеме отражен следующий принцип действия системы угловой ориентации и стабилизации ЛА. В БП вырабатывается векторный управляющий момент $m(t)$ на ЛА. Виды дестабилизирующих воздействий D_1 нарушают работоспособность БП. В блоке диагностирования приводов (БДП) решается задача выявления конкретной причины нарушения работоспособности – \hat{d}_{1i} по сигналам с БП: $u_P(kT_0)$ и управления $u_U(kT_0)$, т.е. формирования диагноза, служащего управляющим воздействием для блока восстановления работоспособности (БВР). В этом блоке выбирается избыточное средство из множества имеющихся R_P , выполняется его подключение для парирования нештатной ситуации, вызванной видом дестабилизации \hat{d}_{1i} , и восстановление работоспособности БП.

БД преобразовывает вектор $\varphi(t)$ углового положения ЛА в соответствующий вектор цифровых измерений $u_\varphi(kT_0)$. При появлении в БД любого вида дестабилизирующего воздействия $\hat{d}_{3i} \in D_3$ в блоке диагностирования датчиков (БДД) формируется диагноз в форме оценок признаков вида \hat{d}_{3i} . На основании этого диагноза в блоке восстановления измерений (БВИ) выбирается избыточное средство из множества имеющихся в БД R_D , затем выполняется его подключение и восстановление искаженных измерений.

ЛА преобразовывает вектор управляющих моментов $m(t)$, соответствующе изменяя угловое положение относительно центра масс $\varphi(t)$, и при любом виде дестабилизации $\hat{d}_{2i} \in D_2$ в блоке диагностирования подсистемы (БДП), при условии работоспособности БП и БД, происходит обнаружение, локализация и идентификация, т.е. формируется полный диагноз \hat{d}_{2i} . По результатам диагностирования в блоке управления подсистемой (БУП) производится выбор из множества R_{LA} имеющихся избыточных средств, соответствующего диагнозу \hat{d}_{2i} , и формируется вектор управляющего воздействия $u_U(kT_0)$, обеспечивающий выполнение функциональной программы требуемой угловой ориентации и стабилизации ЛА.

7. Рациональное управление объектами БП, ЛА и БД, подверженными событийно неопределенной дестабилизации, базируется на автоматизации слабо формализованных интеллектуальных процедур глубокого диагностирования и гибкого восстановления работоспособности в реальном масштабе времени. Поэтому рациональное управление — это искусство возможного интеллектуального управления.

2. Особенности объектов рационального управления

Под объектом рационального управления (ОРУ) понимается конструктивно законченная часть объекта автоматического управления, выполняющая определенные целевые функции и обладающая свойствами, позволяющими осуществлять диагностирование работоспособности с заданной глубиной и восстановление работоспособности с помощью избыточных средств. На блок-схеме (рис. 1) представлено три таких объекта — БП, ЛА и БД.

Окончательный функциональный и конструктивный облик ОРУ получаем в результате решения задач управления объектом автоматического управления,

а также задач диагностического и восстановительного обеспечения. Другими словами, в процессе решения этих задач осуществляется структурное и параметрическое проектирование облика ОРУ.

Для диагностирования и восстановления работоспособности каждый блок должен быть оснащен избыточными средствами. Так, для БП это может быть избыточная конструкция агрегатов, размещенных в пространстве по неколлинеарным осям по схемам «куб», «пирамида» и др. Для БД это могут быть избыточные структуры с использованием как коллинеарно расположенных разнотипных датчиков и функционально связанных результатами измерений, например датчики углов и угловых скоростей, так и неколлинеарно расположенных датчиков в блоке. Для ЛА это — избыточные структурные элементы, например, для самолетов это — секционированные аэродинамические управляющие поверхности. Избыточными функциональными средствами для ОРУ могут быть встроенные функциональные элементы параметрической подстройки, коммутационные элементы, обеспечивающие перераспределение питающих энергий и сигнальных цепей, сигнальные контрольные точки, доступные измерению внутренних сигналов для глубокого диагностирования видов дестабилизирующих воздействий.

В номинальном режиме функционирования преобразовательные свойства каждого ОРУ описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. На этапе эскизного проектирования системы автоматического управления автономными ЛА можно использовать математические модели, полученные в результате линеаризации в ε -окрестности выбранной рабочей точки. Эти модели могут быть представлены в дискретном пространстве состояний, позволяющем наиболее полно отразить необходимые и достаточные свойства ОРУ, используемые для решения задач анализа и синтеза рационального управления. В общем виде такая линейная математическая модель описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x[(k+1)T_0] = Ax(kT_0) + Bu(kT_0); \\ y(kT_0) = Cx(kT_0) + Nu(k); \quad x(0) = x_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $x(kT_0)$ — вектор состояния ОРУ, $x(kT_0) \in X^n$; $u(kT_0)$ — вектор воздействий, $u(kT_0) \in U^r$; $y(kT_0)$ — вектор измеряемых переменных, $y(kT_0) \in Y^m$; A, B, C и N — матрицы коэффициентов; k — номер дискрет, $k \in K$; T_0 — период квантования.

Математические модели ОРУ должны удовлетворять калмановским критериям полной управляемости и полной наблюдаемости в номинальном режиме функционирования.

Для того чтобы в ОРУ выявить вид дестабилизации $d_i \in D$, требуется определенное количество доступных измерений, а также соответствующий характер входных воздействий для однозначного диагностирования причины нарушения работоспособности.

3. Диагностическое обеспечение объектов рационального управления

Функциональное назначение блоков диагностирования БДП, БДД и БДО (рис. 1) заключается в формировании диагнозов \hat{d}_{1i} , \hat{d}_{2i} и \hat{d}_{3i} . Разработка диагностического обеспечения ОРУ $\in \{\text{БП, ЛА, БД}\}$ связана с решением комплекса основных задач, представленных на рис. 2.

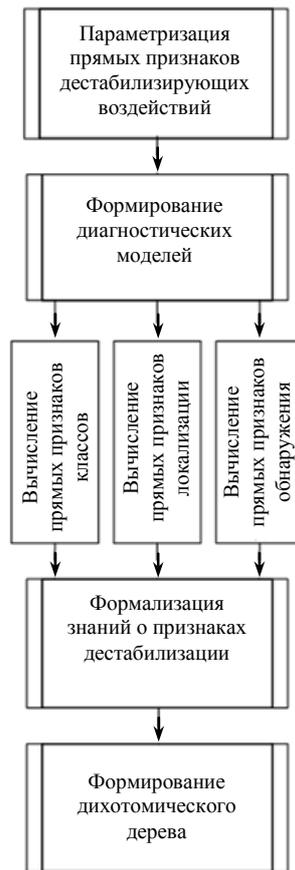


Рис. 2

Рассмотрим на примере обобщенного ОРУ представленные задачи диагностического обеспечения и способы их решения.

3.1. Параметризация прямых признаков дестабилизации. На этапе эскизного проектирования ОРУ, исходя из условий его жизненного цикла, формируется множество дестабилизирующих воздействий (D), которые могут повлиять на значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствующие требованиям технического задания, т.е. на работоспособность.

Для конструктивной параметризации прямых признаков дестабилизации нужно определиться с глубиной диагностирования ОРУ. При решении практических задач глубокого диагностирования и гибкого восстановления работоспособности формирование множества D превращается в актуальную задачу нахождения компромисса между мощностями множества D и множества избыточных ресурсов R , используемых для восстановления работоспособности ОРУ. Формализовать эту задачу нахождения наилучшего соответствия $Q \subset D \times R$ пока не удастся по ряду причин, обусловленных многообразием и неопределенностью дестабилизирующих воздействий. Практический подход к решению этой задачи заключается в итерационном нахождении компромисса в условиях реальных технико-экономических ограничений. После сформированного таким образом множества D по иерархическому принципу выбираются прямые признаки дестабилизирующих воздействий и выполняется их параметризация.

Дестабилизирующее воздействие рассматривается как неопределенное событие, обусловленное неопределенностью момента его появления, неопределенностью

места его возникновения, принадлежности к классу и конкретному виду. Для формирования диагностических моделей ОРУ необходимо ввести параметры, характеризующие такие свойства дестабилизирующих воздействий, как их наличие, принадлежность к месту их проявления и соответствие классам, а также описывающие виды.

Вид дестабилизирующего воздействия — это конкретное его проявление в функциональном элементе, которое можно охарактеризовать числовыми значениями параметров математической модели. Например, для датчика угла — положительный дрейф нуля величиной $0,1^\circ$.

Класс дестабилизирующих воздействий — это подмножество их видов $D_i \subset D$, которое влияет на работоспособность одного функционального элемента и может описываться одним параметром.

Место дестабилизации — это конструктивно законченная часть ОРУ, в которой произошла дестабилизация, характеризующаяся одним параметром.

Предлагается иерархическая схема параметризации, которую условно можно отобразить следующей цепочкой:

$$D \rightarrow P^V \rightarrow P^K \rightarrow P^M \rightarrow P^N, \quad (2)$$

где $P^V = \{d_i\}_1^q$ — множество числовых параметров, характеризующих лингвистическое описание видов дестабилизирующих воздействий d_i ; $P^K = \{\alpha_i\}_1^u$ — множество параметров классов дестабилизации; $P^M = \{\beta_i\}_1^s$ — множество параметров мест дестабилизации; $P^N = \{\gamma_i\}_1^\ell$ — множество параметров, характеризующих наличие дестабилизации.

При параметризации используются разнотипные измерительные шкалы [11]. Параметризация видов дестабилизации и классов — взаимосвязанные процедуры, так как класс формируется из подмножества видов, покрываемых одним параметром, а виды параметризуются в шкале наименований посредством интервализации параметра класса исходя из возможности последующего парирования видов с помощью планируемых избыточных средств.

3.2. Формирование диагностических моделей. Диагностические модели — это математические модели, отражающие однозначную связь косвенных признаков дестабилизации с прямыми. Для обобщенного ОРУ, описываемого в номинальном режиме моделью (1), модель возмущенного движения представим такой системой уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i[(k+1)T_0] &= A(\lambda_i)\tilde{x}_i(kT_0) + B(\lambda_i)u(kT_0); \\ \tilde{y}_i(kT_0) &= C(\lambda_i)\tilde{x}_i(kT_0) + N(\lambda_i); \quad \tilde{x}_i(0) = \tilde{x}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{x}_i(kT_0)$ — вектор возмущенного состояния ОРУ, $\tilde{x}_i(kT_0) \in \tilde{X}^n$; $\tilde{y}_i(kT_0)$ — вектор измерений возмущенного движения, $\tilde{y}_i(kT_0) \in \tilde{Y}^m$; $A(\lambda_i)$, $B(\lambda_i)$, $C(\lambda_i)$ и $N(\lambda_i)$ — матрицы, зависящие от параметра λ_i , $i = \overline{1, \eta}$, характеризующего дестабилизирующее воздействие вида d_i , $d_i \in D$, $\lambda_i \in \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$.

Для получения дополнительного движения ОРУ, обусловленного дестабилизирующим воздействием d_i , характеризуемым параметром λ_i , вычтем из системы уравнений (3) систему уравнений номинального движения (1) и в результате получим

$$\begin{aligned}\Delta x_i(k+1) &= A(\lambda_i)\tilde{x}_i(k) - Ax(k) + B(\lambda_i)u(k) - Bu(k); \\ \Delta y_i(k) &= C(\lambda_i)\tilde{x}_i(k) - Cx(k) + N(\lambda_i)u(k) - Nu(k); \Delta x_i(0) = \Delta x_{i0},\end{aligned}\quad (4)$$

где $\Delta x_i(k) = \tilde{x}_i(k) - x(k)$; $\Delta y_i(k) = \tilde{y}_i(k) - y(k)$. Для упрощения выкладок параметр T_0 опущен.

Разложив в ряд Тейлора зависимости матриц системы (3) от параметра λ_i и ограничившись первыми двумя членами ряда в силу предположения о малости изменения параметра, так как $\Delta\lambda_i^2 \ll \Delta\lambda_i$, получим, что

$$A(\lambda_i) \approx A + A_i\Delta\lambda_i; \quad B(\lambda_i) \approx B + B_i\Delta\lambda_i; \quad C(\lambda_i) \approx C + C_i\Delta\lambda_i; \quad N(\lambda_i) \approx N + N_i\Delta\lambda_i, \quad (5)$$

где A_i, B_i, C_i и N_i — матрицы функций чувствительности по параметру λ_i .

После соответствующих преобразований системы уравнений (4) и упрощений, связанных с малостью сомножителей $\Delta\lambda_i\Delta x_i(k)$, получим

$$\begin{aligned}\Delta x_i(k+1) &= A\Delta x_i(k) + [A_ix(k) + B_iu(k)]\Delta\lambda_i; \\ \Delta y_i(k) &= C\Delta x_i(k) + [C_ix(k) + N_iu(k)]\Delta\lambda_i; \quad \Delta x_i(0) = \Delta x_{i0}.\end{aligned}\quad (6)$$

Если вместо системы уравнений (1) использовать модели номинального движения в форме наблюдателей Люенбергера или статических моделей, можно получить диагностические модели, которые будут отличаться степенью инвариантности к начальным условиям и динамикой.

В соответствии с принципом последовательного снятия неопределенности формирование полного диагноза ОРУ связано с последовательным решением трех основных задач как обратных. Первая — это обнаружение дестабилизации, вторая — локализация, т.е. поиск места дестабилизации, и третья — установление класса дестабилизации.

Диагностические модели используются для формирования алгоритмов получения оценок прямых признаков дестабилизации с помощью косвенных. Другими словами, диагностические модели необходимы для решения обратных задач. Для анализа возможности установить по косвенным признакам $\Delta y_i(k)$ наличие прямых признаков $\Delta\lambda_i$ используются критерии диагностируемости [12]. Диагностируемость — это свойство уравнений (6), характеризующее возможность однозначного определения прямого признака каждого дестабилизирующего воздействия из множества D по косвенным признакам в течение конечного времени.

Критерий структурной диагностируемости. Для структурной диагностируемости ОРУ необходимо и достаточно, чтобы матрицы

$$L_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & N_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, \eta, \quad (7)$$

были линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Критерий сигнальной диагностируемости. Структурно диагностируемый ОРУ L_i^* будет сигнально диагностируемым тогда и только тогда, когда векторы $L_i^*v(k)$, $i = \overline{1, \eta}$, линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Здесь $v^T(k) = [x(k) \ u(k)]$.

Использование критериев диагностируемости позволяет при проектировании ОРУ сформировать такую его структуру и выбрать такие режимы функци-

онирования, которые обеспечивают с помощью диагностических моделей, описываемых системой уравнений (6), решение задач обнаружения, локализации и идентификации однократных дестабилизирующих воздействий.

3.3. Вычисление прямых признаков классов. Задача вычисления прямых признаков классов заключается в формировании алгоритмов вычисления значений $\Delta\alpha_i$ из уравнений диагностических моделей, описывающих классы дестабилизации в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta x_i(k+1) &= A^k \Delta x_i(k) + [A_i^k x(k) + B_i^k u(k)] \Delta\alpha_i; \\ \Delta y_i(k) &= C^k \Delta x_i(k) + [C_i^k x(k) + N_i^k u(k)] \Delta\alpha_i; \quad \Delta x_i(0) = \Delta x_{i0}, \quad i = \overline{1, \mu}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь матрицы с индексом «к» описывают динамические свойства элементарного фрагмента, полученного в результате декомпозиции ОРУ при построении диагностических моделей; μ — количество классов дестабилизации. В представленной системе уравнений, алгебраических по сути, неизвестным параметром будет $\Delta\alpha_i$. Из всех уравнений системы (8) выбирается самое простое по структуре уравнение, из которого формируется алгоритм получения значений $\Delta\alpha_i(k)$ для ряда тактов квантования, $k = \overline{1, m}$. Далее по схеме получения среднеарифметического значения

$$\Delta\epsilon_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta\alpha_i(k) \quad (9)$$

получается оценка прямого признака i -го класса дестабилизирующих воздействий.

Более точную оценку прямого признака $\Delta\hat{\alpha}_i$ можно получить с помощью пакетных или рекуррентных алгоритмов среднеквадратичного оценивания.

Пример 1. Для усилителя мощности, используемого в спутниковой системе управления двигателями-маховиками, диагностическая модель для решения задачи вычисления прямого признака класса может быть представлена уравнением

$$\Delta u_E(k) = \Delta\epsilon_{UM} u_U(k), \quad (10)$$

где $\Delta u_E(k)$ — отклонение напряжения, поступающего на якорную обмотку электродвигателя постоянного тока; $\Delta\epsilon_{UM}(k)$ — прямой признак класса дестабилизации; $u_U(k)$ — входное напряжение усилителя. Для получения оценочного значения неизвестного отклонения можно воспользоваться алгоритмом

$$\Delta\epsilon_{UM} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\Delta u_E(i)}{\Delta u_U(i)} \quad (11)$$

в режиме пакетной обработки или рекуррентным алгоритмом

$$\Delta\epsilon_{UM}(k+1) = \Delta\epsilon_{UM}(k) + \gamma(k) [\Delta u_E(k) - \Delta\epsilon_{UM}(k) \Delta u_U(k)], \quad (12)$$

где $\gamma(k)$ — коэффициент коррекции.

3.4. Вычисление прямых признаков локализации. Задача вычисления прямых признаков локализации состоит в формировании алгоритмов вычисления значений признаков $\Delta\beta_i$ исходя из уравнений, связывающих прямые и косвенные признаки для конструктивно законченных частей объектов диагностики.

Диагностические модели для локализации дестабилизирующих воздействий описываются в общем виде следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta x_i(k+1) &= A^M \Delta x_i(k) + [A_i^M x(k) + B_i^M u(k)] \Delta \beta_i; \\ \Delta y_i(k) &= C^M \Delta x_i(k) + [C_i^M x(k) + N_i^M u(k)] \Delta \beta_i; \Delta x_i(0) = \Delta x_{i0}; \quad i = \overline{1, s}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь матрицы с индексом «*m*» описывают динамические свойства мест локализации — конструктивно законченных частей ОРУ, сформированных в результате построения иерархии диагностических моделей; *s* — число мест локализации дестабилизации. Прямой признак места дестабилизации $\Delta \beta_i$ входит в каждое уравнение представленной системы алгебраических уравнений. Разрешение этой системы относительно признака $\Delta \beta_i$ известными методами приводит к громоздким вычислительным алгоритмам, требующим больших ресурсов, что существенно снижает оперативность диагноза. Поэтому из всех уравнений системы (13) выбирается одно наиболее простое по структуре и разрешается относительно признака $\Delta \beta_i$. Сформированный алгоритм при многократном использовании позволяет получить ряд значений $\Delta \beta_i(k)$. Для получения оценки $\hat{\Delta \beta}_i$ можно применять алгоритмы среднеарифметического или среднеквадратичного усреднения.

Пример 2. Рассмотрим функциональную схему объекта автоматического управления двигателями-маховиками системы ориентации и стабилизации космического аппарата (рис. 3).

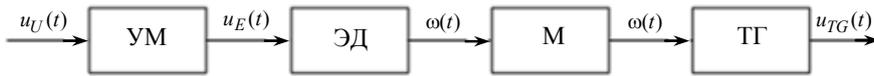


Рис. 3

В схеме используются следующие функциональные элементы: усилитель мощности (УМ), электродвигатель (ЭД), маховик (М) и тахогенератор (ТГ). Связи описаны переменными, соответствующими физическим величинам. В номинальном режиме функциональные элементы описываются элементарными передаточными функциями в форме усилительных и инерционного звеньев, полученными в результате линеаризации реальных характеристик, без учета второстепенных факторов.

Диагностическая модель УМ для задачи локализации соответствует уравнению (10) из примера 1. Диагностические модели для последующих функциональных элементов с прямыми признаками $\Delta \beta_1$ для ЭД и $\Delta \kappa_{TG}$ для ТГ, удовлетворяющие критериям диагностируемости, описываются следующими уравнениями:

$$\Delta \beta_1 \div \begin{cases} \Delta \omega(k+1) = (1 - \frac{T_0}{T_{ED}}) \Delta \omega(k) + \frac{T_0}{T_{ED}} \tilde{\omega}(k) \Delta \beta_1; \\ \Delta u_{TG}(k) = \kappa_{TG} \Delta \omega(k); \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta \kappa_{TG} \div \begin{cases} \Delta \omega(k+1) = (1 - \frac{T_0}{T_{ED}}) \Delta \omega(k) + \frac{T_0 \kappa_{ED}}{T_{ED}} u_E(k); \\ \Delta u_{TG}(k) = \Delta \kappa_{TG} \Delta \omega(k), \end{cases} \quad (15)$$

Здесь T_{ED} — постоянная времени ЭД; $\tilde{\omega}(k)$ — дискретное значение угловой скорости дестабилизированного ЭД; κ_{TG} — коэффициент преобразования ТГ; κ_{ED} — коэффициент преобразования ЭД.

Оценочное значение прямого признака ЭД можно получить с помощью приведения системы (14) к уравнению вида

$$\Delta\beta_1(k) = \left[\Delta u_{TG}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta u_{TG}(k) \right] \frac{T_{ED}}{T_0 u_{TG}(k)}, \quad (16)$$

используя среднеарифметическое усреднение

$$\Delta\hat{\beta}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\beta_1(i). \quad (17)$$

Оценочное значение признака ТГ можно получить посредством приведения системы уравнений (15) к следующему виду:

$$\Delta\kappa_{TG}(k) = \left[\Delta u_{TG}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta u_{TG}(k) \right] \frac{T_{ED}}{T_0 \kappa_{ED} u_E(k)}. \quad (18)$$

Тогда с помощью процедуры среднеарифметического усреднения

$$\Delta\hat{\kappa}_{TG} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\kappa_{TG}(i). \quad (19)$$

Полученные оценки $\Delta\hat{\beta}_1$ и $\Delta\hat{\kappa}_{TG}$ содержат информацию о знаке и величине дестабилизации в ЭД и ТГ.

3.5. Вычисление прямых признаков обнаружения. Задача вычисления прямых признаков обнаружения заключается в формировании алгоритмов вычисления значений признаков $\Delta\gamma_i$. Исходными для формирования этих алгоритмов служат диагностические модели для функциональных блоков БП, ЛА и БД, отражающие связь косвенных признаков дестабилизации $\Delta\gamma_i(k)$ с прямыми $\Delta\gamma_i$ в такой форме:

$$\Delta x_i(k+1) = A^N \Delta x_i(k) + [A_i^N x(k) + B_i^N u(k)] \Delta\gamma_i; \quad (20)$$

$$\Delta\gamma_i(k) = C^N \Delta x_i(k) + [C_i^N x(k) + N_i^N u(k)] \Delta\gamma_i; \quad \Delta x_i(0) = \Delta x_{i0}; \quad i = \overline{1, \ell}.$$

Здесь матрицы с индексом «N» описывают динамические свойства функциональных блоков объекта автоматического управления; ℓ — число параметров $\Delta\gamma_i$, характеризующих наличие дестабилизирующих воздействий, влияющих на работоспособность функционального блока. В общем случае из системы алгебраических уравнений (20) выбирается для каждого прямого признака $\Delta\gamma_i$ одно, наиболее простое с точки зрения разрешения относительного искомого признака. Полученное уравнение используется для получения оценки $\Delta\hat{\gamma}_i$.

Пример 3. Рассмотрим особенности формирования алгоритмов обнаружения дестабилизации в одном канале управления двигателями-маховиками, представленном функциональной схемой (рис. 3). Введем два параметра γ_1 и γ_2 , характеризующих влияние дестабилизирующих воздействий в переходном и установившемся режимах соответственно.

Диагностическая модель для переходного режима будет иметь такой вид:

$$\Delta\omega(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta\omega(k) + \frac{T_0}{T_{ED}} \tilde{\omega}(k) \Delta\gamma_1; \quad (21)$$

$$\Delta u_{TG}(k) = \kappa_{TG} \omega(k).$$

Диагностическая модель, отражающая наличие дестабилизации в установившемся режиме, описывается следующим уравнением:

$$\Delta u_{TG}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta u_{TG}(k) + \frac{T_0 \kappa_{UM} \kappa_{ED} \kappa_{TG}}{T_{ED}} u_U(k) \Delta\gamma_2. \quad (22)$$

Величина прямого признака $\Delta\gamma_1$ вычисляется таким образом:

$$\Delta\gamma_1 = \left[\Delta u_{TG}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta u_{TG}(k) \right] \frac{T_{ED}}{T_0 \tilde{u}_{TG}(k)}. \quad (23)$$

Для получения более точных величин признака можно использовать многократный просчет и среднеарифметическое усреднение.

Для полного прямого $\Delta\gamma_2$ справедливо следующее выражение:

$$\Delta\gamma_2 = \left[\Delta u_{TG}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ED}}\right) \Delta u_{TG}(k) \right] \frac{T_{ED}}{T_0 \kappa_{UM} \kappa_{ED} \kappa_{TG} u_U(k)}. \quad (24)$$

Оценку признака $\hat{\Delta\gamma}_2$ можно получить с помощью описанных ранее методов усреднения.

3.6. Формализация знаний о признаках дестабилизации. Формализация априорных и апостериорных знаний о признаках дестабилизирующих воздействий заключается в таком их машинном представлении, чтобы, оперируя ими, можно было получить в реальном масштабе времени полный диагноз нештатной ситуации, вызванной конкретным дестабилизирующим воздействием.

С помощью диагностических моделей (8), (13) и (20) на этапе эскизного проектирования систем рационального управления формируются, как было описано ранее, алгоритмы вычисления оценок прямых признаков дестабилизации. Следовательно, в процессе последующего диагностирования можно получать оценки на основании априорных знаний о дестабилизирующих воздействиях. На последующих этапах жизненного цикла блоков и, в целом, систем рационального управления ЛА будут проявляться новые дестабилизирующие воздействия, существенно влияющие на работоспособность, а значит, и на безопасность полетов ЛА. Такие новые проявления дестабилизации, по сути, будут представлять апостериорные знания о нештатных ситуациях, вызванных не известными ранее дестабилизирующими воздействиями. Для повышения качества рационального управления необходимо использовать эти новые знания посредством механизмов адаптации. Целесообразно, чтобы априорные и апостериорные знания формализовались с помощью одних и тех же инструментальных средств.

Известно несколько методов формализации знаний в теории искусственного интеллекта. Наиболее эффективным для задач диагностики, как показывает опыт использования экспертных систем, представляется метод формализации с помощью продукций или моделирование, основанное на правилах, позволяющих представить знания в виде предложения типа «если ..., то ...» [13]. Для формализации набора продукций используем двузначные предикатные уравнения общего вида

$$z = S_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in \Omega; \\ 0, & \text{если } x \notin \Omega, \end{cases} \quad (25)$$

где Ω — числовое множество.

Более детальные двузначные предикатные уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2(x-a) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq a; \\ 0, & \text{если } x < a; \end{cases} \\ z_2 &= S_2(b-x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq b; \\ 0, & \text{если } x > b; \end{cases} \\ z_3 &= z_1 \wedge z_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } a \leq x \leq b; \\ 0, & \text{если } x < a \text{ и } x > b. \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь a и b — постоянные числа и $b > a$; \wedge — символ конъюнкции.

При формализации априорных и апостериорных знаний о дестабилизирующих воздействиях исходим из следующего.

1. Дестабилизирующие воздействия представляют собой неопределенные события по времени появления, месту локализации, по классу и виду проявления.

2. Знание о конкретном виде можно получить на основании информации о наличии в объекте диагностики дестабилизации, о месте локализации и о классе дестабилизирующего воздействия.

3. Дестабилизирующие воздействия — это воздействия, которые изменяют статические и динамические характеристики объекта диагностики. Поэтому любые отклонения от номинальных этих характеристик представляют собой виды дестабилизации.

4. Априорные знания о параметрах дестабилизирующих воздействий будут не полными. Поэтому в процессе всего жизненного цикла систем рационального управления при появлении новых дестабилизирующих воздействий необходимо формировать о них новые апостериорные знания, дополняющие априорные.

5. Для компьютерной реализации знаний, как априорных, так и апостериорных, наиболее эффективной формой их формализации служат двузначные предикатные уравнения.

Рассмотрим особенности формализации знаний о признаках дестабилизации на примере.

Пример 4. Для полученных в предыдущих примерах оценок прямых признаков дестабилизации электромаховичного привода формализуем знания.

Знания об обнаружении дестабилизации представим с помощью булевых признаков с использованием оценок прямых признаков $\Delta\mathcal{F}_1$ и $\Delta\mathcal{F}_2$ следующим образом:

$$z_1 = S_2(\delta_1 - |\Delta\mathcal{F}_1|) \wedge S_2(\delta_2 - |\Delta\mathcal{F}_2|). \quad (27)$$

Здесь δ_1 и δ_2 — пороговые значения оценок признаков.

Знания о локализации УМ формализуются с помощью такой предикатной конструкции:

$$z_2 = S_2(|\Delta\mathcal{K}_{UM}| - \delta_3), \quad (28)$$

где δ_3 — пороговое значение оценки признака $\Delta\mathcal{K}_{UM}$.

Знания о локализации ЭД формализуются с помощью следующего предикатного уравнения:

$$z_3 = S_2(|\Delta\mathcal{B}_1| - \delta_4), \quad (29)$$

а для локализации дестабилизации в ТГ используется такое уравнение:

$$z_4 = S_2(|\Delta\mathcal{K}_{TG}| - \delta_5), \quad (30)$$

где δ_4 и δ_5 — допустимые изменения оценок признаков.

Формализуем знания о двух видах дестабилизации УМ: компенсируемое уменьшение коэффициента усиления (d_1) и некомпенсируемое уменьшение коэффициента усиления (d_2) можно осуществить с помощью таких предикатов:

$$z_5 = S_2(\delta_6 - |\Delta\epsilon_{UM}|) \text{ и } z_6 = S_2(|\Delta\epsilon_{UM}| - \delta_6), \quad (31)$$

δ_6 — граничное значение между видами дестабилизации УМ.

Подобным образом формализуются знания о видах дестабилизации в функциональных элементах ЭД и ТГ. Так, для ЭД сформируем предикаты для d_3 (компенсируемое) и d_4 (некомпенсируемое), тогда

$$z_7 = S_2(\delta_7 - |\Delta\beta_1|) \text{ и } z_8 = S_2(|\Delta\beta_1| - \delta_7), \quad (32)$$

где δ_7 — граничное значение между видами дестабилизации ЭД.

Для трех видов дестабилизации ТГ d_5 , d_6 и d_7 сформируем такие предикаты:

$$z_9 = S_2(\delta_8 - |\Delta\epsilon_{TG}|), \\ z_{10} = S_2\{(|\Delta\epsilon_{TG}| - \delta_8) \wedge (\delta_9 - |\Delta\epsilon_{TG}|)\}; \quad z_{11} = S_2(|\Delta\epsilon_{TG}| - \delta_{10}). \quad (33)$$

Здесь δ_8 , δ_9 — граничные значения видов дестабилизации ТГ.

Появляющиеся новые знания о дестабилизации в электромаховичном приводе будут формализовываться аналогичным образом с помощью описанных двузначных предикатных уравнений.

3.7. Формирование дихотомического дерева. Задача формирования дихотомического дерева заключается в систематизации предикатных знаний в соответствии с принципом последовательного снятия неопределенности дестабилизирующих воздействий.

Булева форма представления знаний о признаках дестабилизации позволяет сформировать древовидную дихотомическую структуру быстрого поиска вида дестабилизирующего воздействия [14].

Дихотомическое дерево — это иерархическая структура данных, в которой каждый узел имеет значение и ссылки на левого или правого потомка. Узел, находящийся на самой вершине, называется корнем. Узлы, не имеющие потомков, именуется листьями.

Бинарное дерево является рекурсивной структурой, поскольку каждая его ветвь — бинарное дерево и, следовательно, каждый его узел — корень дерева. Организация данных с помощью бинарных деревьев часто позволяет значительно сократить время поиска нужного элемента. Поиск элемента в линейных структурах данных обычно осуществляется путем последовательного перебора всех элементов данной структуры. Поиск по дереву не требует перебора всех элементов, поэтому занимает значительно меньше времени.

Для оперативности поиска бинарные деревья балансируют по различным критериям, что позволяет сформировать структуру дерева, удовлетворяющую требованиям быстрой реакции процессов диагностирования [12].

С помощью полученных предикатных уравнений о знаниях прямых признаков дестабилизирующих воздействий можно построить опорное дерево поиска диагноза. На последующих этапах жизненного цикла опорное дерево дополняется новыми ветвями из листьев неопределенности ситуаций, возникших при локализации, определении класса и установлении конкретного вида дестабилизирующего воздействия.

Пример 5. Сформируем дихотомическое дерево поиска диагноза для электромаховичного привода с использованием знаний о прямых признаках в форме двузначных предикатных уравнений (27)–(33). Дерево начинается с корневого предиката z_1 , с помощью которого устанавливается факт работоспособности или

неработоспособности привода, другими словами, обнаруживается наличие дестабилизации в приводе. Если $z_1 = 0$, то это свидетельствует об отсутствии дестабилизации в приводе, т.е. его работоспособности — d_0 . При наличии дестабилизации в приводе $z_1 = 1$, и тогда начинается локализация дестабилизированного функционального элемента с помощью предикатов z_2, z_3 и z_4 . Если $z_2 = z_3 = z_4 = 0$, значит, недостаточно априорных знаний для локализации обнаруженной дестабилизации, о чем свидетельствует лист d_L дихотомического дерева поиска диагноза в электромаховичном приводе (рис. 4).

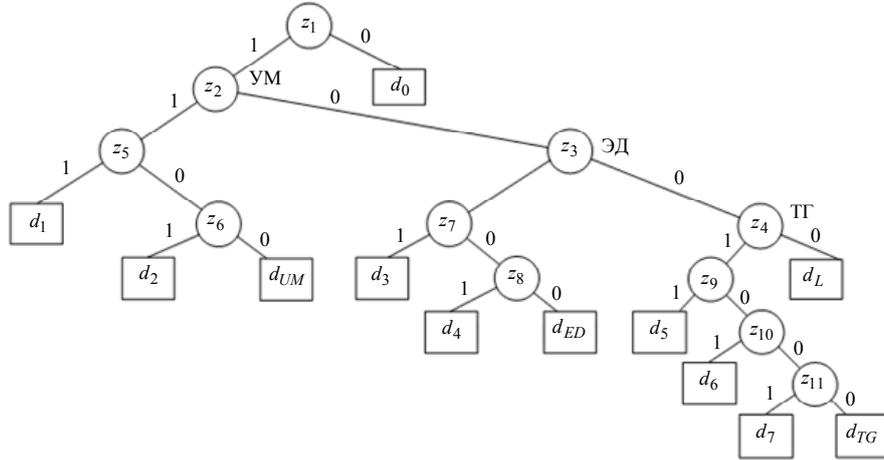


Рис. 4

Если предикат $z_2 = 1$, тогда начинается поиск диагноза в УМ и с помощью предикатов z_5 и z_6 устанавливаются виды дестабилизации d_1 и d_2 . При $z_6 = 0$ получаем информацию о необходимости привлечения апостериорных знаний о дестабилизирующем воздействии в УМ — d_{UM} . Виды дестабилизирующих воздействий ЭД d_3, d_4 и d_{ED} диагностируются с помощью предикатов z_7 и z_8 . Причем лист дерева d_{ED} свидетельствует о недостатке априорных знаний о текущей дестабилизации работоспособности ЭД. Диагноз о видах дестабилизирующих воздействий d_5, d_6 и d_7 в ТГ формируется с помощью предикатов z_9, z_{10} и z_{11} . При $z_{11} = 0$ вытекает диагноз d_{TG} , что свидетельствует о неизвестном виде дестабилизирующего воздействия.

Заключение

Использование предложенного подхода к повышению качества и эффективности долговременного функционирования автономных ЛА базируется на принципе управления по диагнозу. Представленные в статье основные задачи, диагностические модели и методы формирования диагноза — это лишь первые шаги в проблематике рационального управления, отражающие принципиальную возможность формализации такого вида интеллектуальной деятельности, как диагностирование работоспособности систем управления в реальном масштабе времени. При этом используются простейшие математические модели, описывающие процессы дестабилизации в системах управления автономными ЛА. Это — лианеризованные математические модели и соответствующие инструментальные средства линейных преобразований. Процессы влияния дестабилизирующих воздействий на работоспособность систем управления автономными ЛА значительно сложнее линейных представлений, и поэтому требуются последующие шаги по совершенствованию как модельных представлений, так и средств формирования диагностических процедур и их оптимизации.

A.S. Kulik

РАЦИОНАЛЬНОЕ КЕРУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОНОМНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. Частина 1

Представлено основні положення раціонального керування, яке базується на принципі керування за діагнозом. Запропоновано декомпозицію проблеми раціонального керування на ряд основних завдань та описано можливі способи вирішення задач діагностики щодо формування машинних процедур оперативного діагнозу. Наведено ілюстраційні приклади.

A.S. Kulik

RATIONAL CONTROL OF THE OPERABILITY OF AUTONOMOUS AIRCRAFTS. Part 1

The main issues of rational control based on the control by diagnosis principle are presented. Decomposition of the rational control problem into few particular fundamental problems is proposed; and possible solutions of diagnostic problems associated with forming machine-based procedures of operative diagnosing are described. Demonstration examples are presented.

1. *Цыткин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. — М. : Наука, 1968. — 400 с.
2. *Beard R.* Failure accommodation in linear systems through self-reorganization: Ph.D Thesis. — MIT, Cambridge, 1971. — 364 p.
3. *Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д.* Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. — М. : Наука, 1980. — 244 с.
4. *Саридис Дж.* Самоорганизующиеся стохастические системы управления. — М. : Наука, 1980. — 400 с.
5. *Фрадков А.Л.* Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. — М. : Наука, 1990. — 296 с.
6. *Кунцевич В.М.* Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. — Київ : Наук. думка, 2006. — 261 с.
7. *Житецкий Л.С., Скурехин В.И.* Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями. — Київ : Наук. думка, 2010. — 301 с.
8. *Кулик А.С.* Элементы теории рационального управления объектами. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2016. — 255 с.
9. *Kulik A.S.* Control system fault-tolerant ensuring via self-organization // Proc. of Second International Conference «Intelligent System Engineering», Hamburg, 1994. — P. 461–466.
10. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. — М. : Физико-математическая литература, 2000. — 352 с.
11. *Перегудов Ф.И.* Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. — М. : Высш. шк., 1989. — 367 с.
12. *Кулик А.С.* Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления // Бизнес-Информ. — Харьков : Гос. аэрокосм. ун-т. «ХАИ», 2000. — 260 с.
13. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: Современный подход, 2-е изд. — М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. — 1410 с.
14. *Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О.* Конкретная математика. Основание информатики. — М. : Мир, 1998. — 703 с.

Получено 20.02.2017