

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 519.876.2:62-50 (047)

А.С. Кулик

РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ АВТОНОМНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. Часть 2

Введение

Тенденция возрастающих требований к эффективности всего жизненного цикла автономных летательных аппаратов обуславливает расширение и углубление научных и прикладных поисковых исследований моделей, методов и средств парирования дестабилизирующих воздействий. Дестабилизирующие воздействия, такие как возмущения, шумы и отказы, приводят к нарушению работоспособности приводов, объектов управления и датчиков автономных летательных аппаратов, т.е. к нештатным ситуациям. Эффективное парирование нештатных ситуаций возможно только на основании знания устранимых причин дестабилизирующих воздействий. В части 1 данной работы были рассмотрены сущность принципа управления по диагнозу и средства получения знаний о видах дестабилизации [1]. Полная информация (диагноз) о наличии дестабилизации, месте ее возникновения, классе и конкретном виде позволяет перейти к следующему этапу рационального управления — восстановлению работоспособности. В ряде работ по адаптивному управлению используется принцип косвенного парирования только внешних воздействий, нарушающих работоспособность, посредством сигнальной и параметрической подстроек, обеспечивающих асимптотическое восстановление работоспособности [2–4]. Для синтеза алгоритмов подстройки применяется метод синтезирующих функций А.М. Ляпунова.

Сигнальная и параметрическая подстройки — не единственно возможные средства для восстановления работоспособности. Широко применяются и такие средства, как реконфигурация алгоритмов и аппаратуры [5–7]. В этих работах рассматривается реконфигурация только применительно к катастрофическим отказам в системах управления и в предположении устойчивой динамики процессов восстановления работоспособности.

Актуальной представляется тема гибкого использования известных средств восстановления работоспособности по результатам глубокого диагностирования объектов автоматического управления автономных летательных аппаратов.

В данной работе предложена структуризация процессов восстановления работоспособности по диагнозу. Описаны основные задачи восстановления и методы возможного их решения.

1. Восстановление работоспособности объектов рационального управления

Процесс перевода объекта рационального управления (ОРУ) из неработоспособного состояния в работоспособное посредством избыточных средств и

© А.С. КУЛИК, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 4*

процедур, обеспечивающих парирование дестабилизирующих воздействий на конечном интервале времени, является восстановлением его работоспособности.

В блок-схеме, представленной на рис. 1 в [1], функциональное назначение блока восстановления работоспособности (БВР), блока восстановления измерений (БВИ) и блока управления подсистемой (БУП) заключается в восстановлении работоспособности соответствующих блоков — объектов рационального управления — по диагнозам \mathcal{A}_{1i} , \mathcal{A}_{2i} и \mathcal{A}_{3i} . Разработка аппаратных и алгоритмических средств восстановления работоспособности ОРУ — блока приводов (БП), летательного аппарата (ЛА) и блока датчиков (БД) — связана с решением ряда базовых задач, представленных на рис. 1.

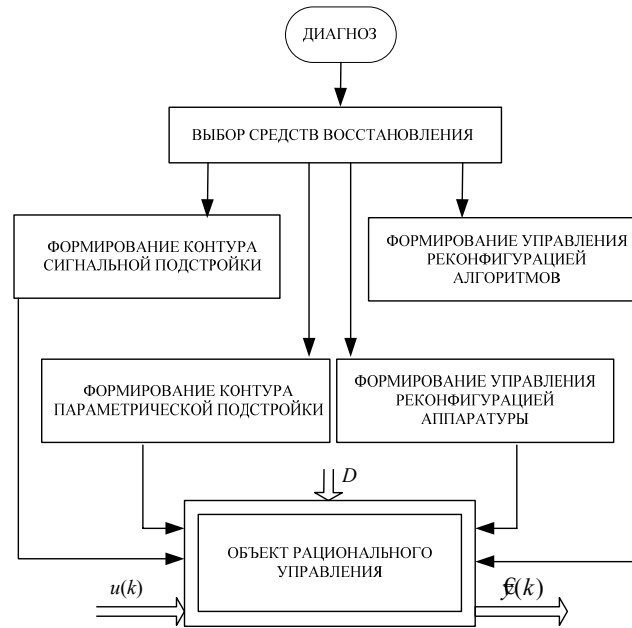


Рис. 1

ОРУ восстанавливаем, если сформированы средства восстановления, позволяющие компенсировать влияние прямых признаков $\Delta\gamma_i$, $\Delta\beta_i$ и $\Delta\alpha_i$ так, что $\Delta y_i(k) \rightarrow 0$ на конечном допустимом интервале времени. В зависимости от устройства и принципа действия ОРУ, выбираются аппаратные и алгоритмические средства восстановления работоспособности. Наиболее приемлемые средства восстановления работоспособности — параметрическая и сигнальная подстройки, реконфигурация алгоритмов и аппаратуры. При формировании средств восстановления работоспособности ОРУ можно использовать различные типовые технико-экономические критерии. С точки зрения рационального использования средств и долговременного функционирования автономных летательных аппаратов целесообразно использование критерия многофункциональности, отражающего способность средства восстановления парировать не одно, а несколько дестабилизирующих воздействий.

2. Выбор средств восстановления

В режиме реального времени, т.е. в динамическом режиме, должен выполняться выбор средств восстановления работоспособности блоков рациональной системы управления. Динамический режим выбора обусловлен как текущим диагнозом, так и наличием избыточных ресурсов восстановления. Рациональный выбор возможен на основании текущей базы знаний о средствах восстановления работоспособности, представленной с помощью табл. 1, где по горизонтали раз-

мещены виды дестабилизирующих воздействий $d_i, i = \overline{1, q}$, а по вертикали — средства восстановления, используемые для их нейтрализации $v_j, j = \overline{1, \mu}$.

В процессе проектирования и конструирования для каждого блока — объекта рационального управления — формируются требуемые средства восстановления работоспособности. В соответствии с критерием многофункциональности выбираются такие средства, которые могут парировать несколько видов d_i , что отражается с помощью переменной σ_{ij} , принимающей значения 1, если можно нейтрализовать вид d_i дестабилизации с помощью средства восстановления v_j , и 0 — в противном случае.

Параметры $\ell_j, j = \overline{1, \mu}$, численно равные количеству единиц в столбце, характеризуют ранг средств восстановления. Чем больше видов d_i дестабилизации можно нейтрализовать посредством использования средства v_j , тем выше его ранг ℓ_j .

Параметр c_i , численно равный сумме единиц в строке, характеризует уровень восстанавливаемости вида d_i дестабилизации. Чем больше c_i , тем большим количеством средств можно восстановить работоспособность блока при появлении вида d_i дестабилизирующего воздействия. И чем меньше величина c_i , тем меньшим количеством средств v_j можно восстановить работоспособность. Таблица формируется из условий удовлетворения таким критериям восстанавливаемости: $\forall c_i \geq c_T, i = \overline{1, q}$, и $\forall \ell_j \geq \ell_D, j = \overline{1, \mu}$. Здесь c_T — требуемое значение уровня восстанавливаемости, а ℓ_D — допустимый ранг средства восстановления.

Таблица 1

Виды	Средства восстановления				Уровень
	v_1	v_2	...	v_μ	
d_1	σ_{11}	σ_{12}	...	$\sigma_{1\mu}$	c_1
d_2	σ_{21}	σ_{22}	...	$\sigma_{2\mu}$	c_2
...
d_q	σ_{q1}	σ_{q2}	...	$\sigma_{q\mu}$	c_q
Ранг	ℓ_1	ℓ_2	...	ℓ_μ	

В процессе функционирования системы рационального управления в табл. 1 отражается текущее состояние наличных средств восстановления, т.е. каждый раз при выборе и использовании средства восстановления v_j из табл. 1 удаляется соответствующий столбец. По сути, табл. 1 представляет собой динамическую структуру базы знаний средств восстановления. Продукционные правила в эквивалентном формате продукционной базы знаний по восстановлению работоспособности формируются по строкам табл. 1 так: если диагноз d_i , то ему соответствуют средства восстановления, для которых $\sigma_{ij} = 1$. Выбор средства восстановления для текущей ситуации осуществляется посредством анализа рангов средств восстановления по такому правилу: если диагноз d_i и среди всех средств, для которых $\sigma_{ij} = 1$, ℓ_j имеет минимальное значение, то выбирается средство восстановления v_j .

3. Формирование контура сигнальной подстройки

Задача формирования контура сигнальной подстройки заключается в синтезе алгоритмов получения дополнительного управляющего воздействия для ОРУ, обеспечивающего такую компенсацию вида дестабилизирующего воздействия, что восстанавливается работоспособность.

В целях упрощения дальнейшего изложения особенностей формирования контура рассмотрим векторный случай диагностической модели (6) [1] в одной из наблюдаемых канонических форм для вида дестабилизирующего воздействия d_i :

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y_i(k) + [G_i y(k) + H_i u(k)]\Delta\alpha_i; \Delta y_i(0) = \Delta y_{i0}. \quad (1)$$

Здесь G — матрица динамики; G_i и H_i — матрицы функций чувствительности по параметру $\Delta\alpha_i$.

Второе слагаемое уравнения, по сути, представляет собой сигнальную характеристику вида дестабилизирующего воздействия d_i с параметрическим признаком $\Delta\alpha_i$. Это параметрическое возмущение привело к отклонению выходного сигнала ОРУ — $\Delta y_i(k)$. Для сигнальной компенсации этого параметрического возмущения необходимо сформировать дополнительное управляющее воздействие $u_d(k)$. Параметрическое возмущение, вызванное $\Delta\alpha_i$, представим соответствующим эквивалентным начальным условием и, преобразовав исходное уравнение, получим

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y_i(k) + Ru_d(k); \Delta y_i(k) \in \Omega, \quad (2)$$

где R — матрица управления, Ω — область эквивалентных начальных условий, содержащих начало координат и некоторую конечную ее окрестность.

Алгоритм формирования дополнительного управляющего воздействия $u_d(k)$ получим с помощью дискретного аналога второго метода А.М. Ляпунова [8], позволяющего обеспечивать условие асимптотической устойчивости в некоторой области или в целом. Второй, прямой метод Ляпунова сводится к построению специальной вспомогательной скалярной функции, называемой функцией Ляпунова $V[\Delta y_i(k)]$.

Если для системы (2) в некоторой области Ω существует определенно-положительная функция $V[\Delta y_i(k)]$, первая разность которой $V[k, k+1]$, вычисленная в силу уравнения (2), будет определенно-отрицательной, то положение равновесия будет асимптотически устойчивым, т.е. $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta y_i(k) = 0$.

Рассмотрим метод получения достаточных условий сигнальной компенсации отклонений $\Delta y_i(k)$, а также алгоритм подстройки с помощью функций Ляпунова следующего вида:

$$V[\Delta y_i(k)] = \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k), \quad (3)$$

где $Q = Q^T > 0$. Такая функция будет определенно-положительной в области Ω , следовательно, удовлетворяет требованиям функций Ляпунова.

Первую разность функции Ляпунова

$$V[k, k+1] = V[\Delta y_i(k+1)] - V[\Delta y_i(k)] \quad (4)$$

определим с использованием уравнения (2) со скалярным управлением $ru_d(k)$, в результате получим

$$\begin{aligned}
\Delta V[k, k+1] &= \Delta y_i^T(k+1)Q\Delta y_i(k+1) - \Delta y_i^T(k)Q\Delta y_i(k) = \\
&= [G\Delta y_i(k) + ru_d(k)]^T Q[G\Delta y_i(k) + ru_d(k)] - \Delta y_i^T(k)Q\Delta y_i(k) = \\
&= \Delta y_i^T(k)G^T QG\Delta y_i(k) + r^T QG\Delta y_i(k)u_d(k) + \Delta y_i^T(k)G^T Qru_d(k) + \\
&\quad + r^T Qru_d^2(k) - \Delta y_i^T(k)Q\Delta y_i(k) = \Delta y_i^T(k)[G^T QG - Q]\Delta y_i(k) + \\
&\quad + 2\Delta y_i^T(k)G^T Qru_d(k) + r^T Qru_d^2(k).
\end{aligned} \tag{5}$$

Управляющее воздействие $u_d(k)$ выберем из условия обеспечения в области Ω для конечной разности выполнения неравенства $\Delta V[k, k+1] < 0$, т.е. условия определенной отрицательности функции. Функция будет определено-отрицательной при выполнении таких условий:

$$G^T QG - Q = -P, \text{ где } P = P^T > 0; \tag{6}$$

$$2\Delta y_i^T(k)G^T Qru_d(k) + r^T Qru_d^2(k) = 0. \tag{7}$$

Для выполнения первого условия задают квадратичную положительную матрицу P и вычисляют исходя из равенства (6) матрицу Q , удовлетворяющую требованию $Q = Q^T > 0$. Выполнение второго условия (7) связано с выбором $u_d(k)$, обеспечивающим нулевое значение суммы двух слагаемых в области Ω . Разрешив уравнение (7) относительно скалярной функции $u_d(k)$, получим два значения:

$$\begin{aligned}
1) \quad u_d(k) &= 0, \\
2) \quad u_d(k) &= -(r^T Qr)^{-1} 2\Delta y_i^T(k)G^T Qr.
\end{aligned} \tag{8}$$

Первое решение тривиально и физически неприемлемо. Второе решение представляет собой алгоритм формирования управляющего скалярного воздействия, обеспечивающего асимптотическую устойчивость относительно значения $\Delta y_i(k) = 0$ в области Ω .

При алгоритме управления (8) для системы (2) справедлива суммарная оценка качества подстройки

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} \Delta y_i^T(k)P\Delta y_i(k) \leq \Delta y_i^T(k_0)Q\Delta y_i(k_0), \quad \forall \Delta y_i(k_0) \in \Omega. \tag{9}$$

Для обеспечения определенной отрицательности конечной разности $\Delta V[k, k+1]$ условие (7) — не единственно возможное достаточное условие. Возможны и другие условия [2, 8], обеспечивающие $\Delta V[k, k+1] < 0$, а следовательно, и другие алгоритмы сигнальной компенсации отклонений $\Delta y_i(k)$.

Рассмотренный метод синтеза скалярных компенсирующих сигнальных воздействий применим и в случае формирования векторных дополнительных управлений $u_d(k)$ (2). При этом можно поступить следующим образом. Все компоненты вектора $u_d(k)$, кроме первой $u_{d1}(k)$, приравнивают к нулю. В соответствии с изложенной методикой формируют для такой системы управление $u_{d1}(k)$, обеспечивающее асимптотическую устойчивость. Аналогичным образом находят выражения для других компонент вектора $u_d(k)$.

Таким образом, алгоритмы сигнальной подстройки, синтезированные с помощью дискретного аналога второго метода Ляпунова, позволяют обеспечить компенсацию видов дестабилизирующих воздействий с заданным по критерию (3) качеством.

4. Формирование контура параметрической подстройки

Задача формирования контура параметрической подстройки состоит в выборе параметрически подстраиваемых параметров, предусмотренных в ОРУ, и синтезе алгоритмов подстройки. Подстройка параметров производится с помощью алгоритмов, использующих косвенную информацию о дестабилизирующих воздействиях в форме отклонений $\Delta y_i(k)$. Эти алгоритмы должны осуществить такое изменение подстраиваемых параметров, чтобы компенсировать влияние диагностированного дестабилизирующего воздействия вида d_i и обеспечить перевод ОРУ из неработоспособного состояния в работоспособное, т.е. восстановить его работоспособность.

Рассмотрим простейший случай описания ОРУ (1), представленного в [1], в одной из канонических наблюдаемых форм, для которой диагностическая модель для d_i -го вида дестабилизирующего воздействия может быть описана векторно-матричным уравнением (1). Рассмотрим метод синтеза алгоритмов параметрической подстройки, основанный на тех же положениях аппарата функций Ляпунова, что и синтез алгоритмов сигнальной подстройки. Предположим, что подстройка производится с помощью коэффициента $\mu(k)$, изменяющего коэффициент передачи ОРУ по одному каналу. Тогда для случая скалярного управления отклонения выходных сигналов можно представить уравнением

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y_i(k) + \mu(k)r_j u_j(k); \Delta y_i(k_0) \in \Omega, \quad (10)$$

где r_j — j -й столбец матрицы R ; $u_j(k)$ — j -я компонента вектора управления $u(k)$. Качество восстановления работоспособности будем оценивать с помощью функции

$$V[\Delta y_i(k)] = \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k), \quad (11)$$

где $Q = Q^T > 0$. Эта функция $V[\cdot] = 0$ при $\Delta y_i(k) = 0$ и $V[\cdot] > 0$ для $\forall \Delta y_i(k) \in \Omega$, т.е. функция определенно-положительная. В соответствии с дискретным аналогом второго метода Ляпунова получим такое выражение:

$$\begin{aligned} V[k, k+1] = \\ = \Delta y_i^T(k) [G^T Q G - Q] \Delta y_i(k) + \mu(k) [2u_j(k) r_j^T Q G \Delta y_i(k) + \mu(k) u_j^2(k) r_j^T Q r_j]. \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно второму методу Ляпунова, чтобы динамическая система (10) была асимптотически устойчивой в области Ω , достаточно обеспечить функции $V[k, k+1]$ свойства $\Delta V[\cdot] = 0$ при $\Delta y_i(k) = 0$ и $\Delta V[\cdot] < 0 \forall \Delta y_i(k) \in \Omega$, которые характерны для определенно-отрицательных функций. Первое слагаемое функции (12) обеспечивает ей определенную отрицательность, если

$$G^T Q G - Q = -P, \quad (13)$$

здесь $P = P^T > 0$. Одно из возможных условий, при котором второе слагаемое обеспечивает $\Delta V[\cdot]$ требуемые свойства, состоит в выполнении равенства

$$\mu(k) [2u_j(k) r_j^T Q G \Delta y_i(k) + \mu(k) u_j^2(k) r_j^T Q r_j] = 0. \quad (14)$$

Выполнение этого равенства можно обеспечить выбором соответствующей скалярной функции $\mu(k)$.

Тривиальное решение уравнения (14) — $\mu(k) = 0$ — не представляет практического интереса. Второе решение

$$\mu(k) = -2[r_j^T Q r_j]^{-1} u_j^{-1}(k) r_j^T Q G \Delta y_i(k) \quad (15)$$

приемлемо с практической точки зрения и по сути является алгоритмом подстройки параметра $\mu(k)$ по значениям отклонения $\Delta y_i(k)$. Такой алгоритм обеспечивает в области Ω компенсацию i -го вида дестабилизирующего воздействия со следующей оценкой качества:

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} \Delta y_j^T(k) P \Delta y_i(k) \leq \Delta y_j^T(k_0) Q \Delta y_i(k_0), \quad \forall \Delta y_i(k_0) \in \Omega. \quad (16)$$

На рис. 2 представлена структурная схема контура подстройки одного параметра.

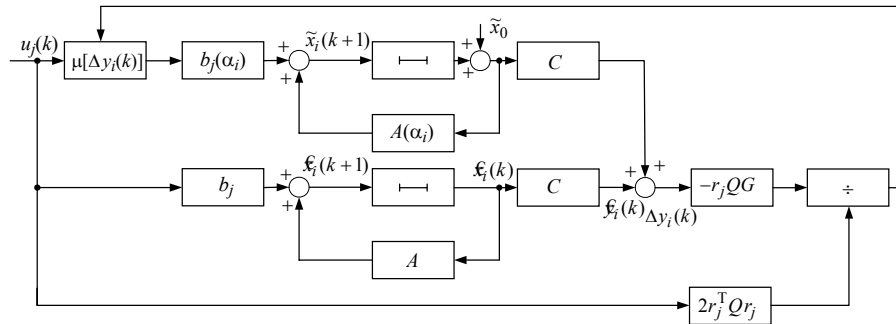


Рис. 2

При использовании в ОРУ нескольких подстроечных коэффициентов алгоритмы их изменения могут быть получены с помощью рассмотренного метода, который необходимо применять последовательно для каждого коэффициента при учете уже синтезированных контуров параметрической подстройки.

5. Формирование управления реконfigurацией алгоритмов

Задача управления реконfigurацией алгоритмов заключается в формировании циклограммы и средств коммутации, обеспечивающих введение резервных алгоритмических средств.

Необходимость введения резервных алгоритмов обуславливается следующим обстоятельством. При появлении в ОРУ некомпенсируемых с помощью сигнальной и параметрической подстроек видов дестабилизации требуется для восстановления работоспособности применять другие средства. Некомпенсируемые виды дестабилизирующих воздействий приводят, как правило, к такому изменению функциональных свойств ОРУ, при котором дальнейшая его эксплуатация либо невозможна, либо возможна, но в другом режиме функционирования. Работоспособность ОРУ в таких ситуациях может быть восстановлена посредством реконfigurации. Реконfigurация представляет собой процесс изменения структуры отказавшего ОРУ путем выведения из функционирования дефектных модулей, исчерпавших свои функциональные возможности, и подключения дополнительных, избыточных, резервных средств.

Различают реконfigurацию алгоритмов и аппаратуры. Особенность реконfigurации алгоритмов заключается в том, что вместо дефектного физического

модуля или алгоритма подключается резервный алгоритм, парирующий текущую дестабилизацию. К реконфигурации алгоритмов предъявляется ряд специфических требований, обусловленных необходимостью при практической реализации оперативного и эффективного восстановления работоспособности ОРУ. Эти требования связаны с проведением согласованных во времени коммутационных операций, обеспечением максимально возможного согласования начальных условий подключаемых резервных алгоритмов с условиями ОРУ, созданием условий для «мягкого» включения алгоритмов в процесс функционирования в целях исключения переходных процессов, невыгодных с энергетической, функциональной, надежностной точек зрения, а также такого включения, при котором обеспечивается предельно быстрое восстановление работоспособности с приемлемыми показателями качества.

Выполнение всех требований, предъявляемых к реконфигурации алгоритмов, достигается в результате формирования соответствующего управления реконфигурацией. В ряде случаев задачу управления реконфигурацией алгоритмов можно свести к задаче алгоритмического обеспечения процесса восстановления работоспособности ОРУ с помощью второго метода Ляпунова. Для понимания сути процессов реконфигурации алгоритмов обратимся к простому примеру.

Пример. Рассмотрим на примере датчиков углового положения ЛА в канале тангажа принципы управления реконфигурацией алгоритмов. При измерении углового положения ЛА относительно центра масс в ряде случаев используют информационную избыточность. Наряду с гироскопическими датчиками углов применяют датчики угловых ускорений. В качестве таких датчиков обычно используют двухстепенные гироскопы. Рассмотрим датчики в канале тангажа, измеряющие угол и угловую скорость в соответствии с уравнением

$$\begin{bmatrix} u_{\nu}(k) \\ u_{\omega z}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{\nu} & 0 \\ 0 & \kappa_{\omega z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu(k) \\ \omega_z(k) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $u_{\nu}(k)$ — дискретные значения выходного сигнала датчика угла тангажа; $u_{\omega z}(k)$ — дискретные значения выходного сигнала датчика угловой скорости; $\nu(k)$ — дискретные значения угла тангажа; $\omega_z(k)$ — дискретные значения угловой скорости тангажа; κ_{ν} и $\kappa_{\omega z}$ — коэффициенты передачи датчиков.

При некомпенсируемой дестабилизации датчика угла тангажа восстановить его измерения можно следующим способом. Угол тангажа $\nu(t)$ и угловая скорость $\omega_z(t)$ связаны известным соотношением $\dot{\nu}(t) = \omega_z(t)$. Из этого соотношения следует, что $\nu(t) = \int_{t_0}^t \omega_z(t) dt$. Следовательно, восстановить сигнал датчика

угла можно по показаниям датчика угловой скорости посредством соответствующего алгоритма обработки данных $u_{\omega z}(k)$. Такой алгоритм должен обеспечить численное интегрирование дискретных значений $u_{\omega z}(k)$. Известно несколько методов такого интегрирования. Применение простейшего из них — метода прямоугольников — позволяет сформировать алгоритм оценочных значений $\hat{\kappa}_{\nu}(k)$ в таком виде:

$$\hat{\kappa}_{\nu}(k+1) = \hat{\kappa}_{\nu}(k) + \frac{T_0 \kappa_{\nu}}{\kappa_{\omega z}} u_{\omega z}(k). \quad (18)$$

Управление реконfigurацией можно представить следующей вектор-строкой:

$$r = [r_1(k), r_2(k+m), r_3(k+n)], \quad (19)$$

здесь $r_1(\cdot)$ — элементы строки, принимающие значение 0 или 1 по следующему правилу. В исходном состоянии все элементы нулевые. При получении диагноза о некомпенсируемой дестабилизации датчика угла $r_1(k) = 1$, что служит командой для блокирования формирования и использования массива u_v с данными $u_v(k)$. Следующий элемент связан с предыдущим соотношением $r_2(k+m) = r_1(k+m)$, т.е. $r_2(k+m)$ принимает значение 1 через m тактов квантования по отношению к $r_1(k)$. Единичное значение элемента $r_2(k+m)$ служит командой для отключения питания датчика угла. Элемент $r_3(k+n) = r_1(k+n)$, т.е. принимает значение 1 после $n > m$ тактов квантования с момента начала реконfigurации, и при этом значении включается в работу алгоритм (18).

При некомпенсируемой дестабилизации датчика угловой скорости восстановить его измерения можно по результатам измерения угла, воспользовавшись в простейшем случае формулой Эйлера, тогда

$$\epsilon_{\omega z}(k) = \frac{u_v(k+1) - u_v(k)}{T_0}. \quad (20)$$

Управление реконfigurацией в этом случае можно осуществить с помощью вектор-строки, аналогичной вектор-строке (19).

При использовании в каналах управления ЛА блока датчиков без избыточностей для диагностируемости и восстанавливаемости в его структуру вводят соответствующие эталонные модели, воспроизводящие текущие оценочные значения измерений. При некомпенсируемой дестабилизации какого-либо датчика посредством соответствующих коммутаций производится его изоляция из контура управления и включение в работу массива оценочных значений измерений.

Описанный подход дает представление об основных принципах и средствах, используемых при формировании процедур реконfigurации алгоритмов. Для каждого конкретного вида дестабилизирующего воздействия, исходя из имеющихся избыточных ресурсов и особенностей функционирования восстанавливаемого фрагмента ОРУ, в соответствии с изложенным разрабатывается процедура реконfigurации алгоритмов. Эта процедура должна быть исследована методом цифрового моделирования в целях рационального формирования моментов коммутации и оценивания качества восстановления работоспособности.

6. Формирование управления реконfigurацией аппаратуры

Использование избыточной резервной аппаратуры представляет собой известный подход обеспечения отказоустойчивого функционирования систем управления автономными летательными аппаратами. Известно два вида резервирования: постоянное и динамическое. При постоянном резервировании, как правило, в мажоритарных структурах блоков возможно восстановление частично деградировавшей аппаратуры. При этом согласно принципу управления по диагнозу необходимо произвести оперативное диагностирование и соответствующую полученному диагнозу подстройку, обеспечивающую восстановление работоспособности блока.

С технико-экономической точки зрения наиболее эффективно динамическое резервирование, при котором аппаратура, находящаяся в резерве, включается в работу лишь по команде замещения неработоспособной аппаратуры. Замена не-

работоспособной аппаратуры резервной производится посредством коммутации энергетических и информационных связей, обеспечивающих выведение из блока одной аппаратуры и введение в функционирование другой, работоспособной. При этом переходные процессы, обусловленные коммутацией, не должны оказывать негативного влияния на ресурс другой аппаратуры и работоспособность всей системы управления в целом.

Резервная аппаратура должна иметь способность выходить на требуемый режим функционирования за время, соизмеримое с допустимым временем восстановления работоспособности системы управления. Реализация реконфигурации аппаратуры связана с использованием дополнительных как аппаратных, так и программных средств. Аппаратные средства — это дополнительная резервная аппаратура, а также электронные или электромеханические коммутаторы в цепях питания (электрической, пневматической, гидравлической и других видов энергии) и сигнальных цепях, по которым передается управленческая информация.

Программные средства представляют собой машинные программы, формирующие управление процессом коммутации и подготовку резервной аппаратуры к работе, т.е. это программы управления реконфигурацией аппаратуры. В общем случае управление реконфигурацией аппаратуры заключается в выдаче команд по соответствующей циклограмме на коммутаторы, на процесс формирования машинных входных и выходных данных резервной аппаратуры и процесс подготовки этой аппаратуры к использованию, на контроль поведения ОРУ в процессе коммутации и на другие функциональные средства, используемые для реконфигурации аппаратуры.

Формирование управления реконфигурацией аппаратуры можно осуществлять с помощью рассмотренных ранее методов синтеза, базирующихся на функциях А.М. Ляпунова. Для этого сначала опишем функции алгоритма коммутации. В результате диагностики ОРУ и выбора средств реконфигурации аппаратуры формируется результирующий сигнал $\mu = 1$, подаваемый на коммутатор. При этом коммутатор должен осуществить отключение отказавшей аппаратуры и подключение резервной. Функцию, управляющую работой коммутатора при однократном резерве, опишем в терминах булевой алгебры следующей переключающей функцией:

$$F(\mu, \varphi) = \begin{cases} \gamma_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } \bar{\mu} = 0; \\ \varphi, & \text{если } \bar{\mu} = 1; \end{cases} \\ \gamma_2 = \begin{cases} \varphi, & \text{если } \mu = 1; \\ 0, & \text{если } \mu = 0, \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

где γ_1 — переключающая функция отключения отказавшей аппаратуры; γ_2 — переключающая функция подключения резервной аппаратуры; φ — энергетическое обеспечение аппаратуры.

Для иллюстрации принципа формирования реконфигурируемого управления построим функционально-логическую структуру алгоритма управления реконфигурацией аппаратуры. Для дестабилизирующего движения ОРУ, вызванного отказом аппаратуры, и при однократном резерве можно сформировать такое уравнение:

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y_i(k) + b \begin{Bmatrix} r_1(\gamma_{11}, \gamma_{21}) \\ r_2(\gamma_{12}, \gamma_{22}) \end{Bmatrix}; \quad \Delta y_i(k) \in \Omega, \quad (22)$$

где $\begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = F_1(\mu, \varphi)$; $\begin{bmatrix} \gamma_{21} \\ \gamma_{22} \end{bmatrix} = F_2(\mu, u(t))$.

Графически процесс коммутации можно представить с помощью структурной схемы (рис. 3).

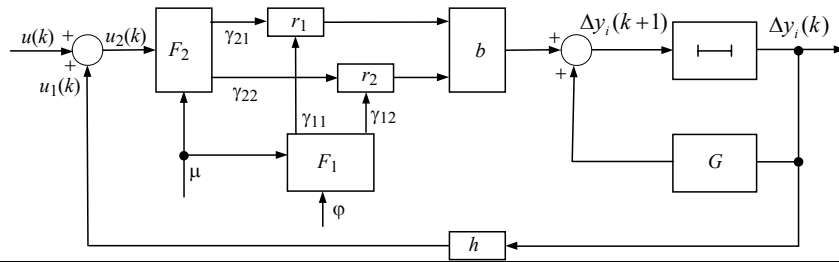


Рис. 3

Логика работы схемы состоит в следующем. Предположим, что в процессе функционирования ОРУ произошло событие d_i , состоящее в отказе исполнительного устройства r_1 . В этом случае в результате диагностики и выбора резервного исполнительного органа r_2 формируется сигнал $\mu = 1$, который обуславливает следующее значение выходов функций $F_1(\cdot)$ и $F_2(\cdot)$: $\gamma_{11} = 0$; $\gamma_{12} = \varphi$; $\gamma_{21} = 0$; $\gamma_{22} = u_2(k)$. Полученные значения выходов переключающих функций обеспечивают отключение в отказавшем устройстве r_1 цепей питания φ и управления $u(k)$ и подключение резервного исполнительного устройства r_2 . Сигнал управления $u_1(k)$ формируется из условия обеспечения асимптотического убывания отклонения $\Delta y_i(k)$. С помощью синтезирующих функций А.М. Ляпунова можно получить структуру и параметры оператора h в обратной связи представленной схемы аналогично описанным ранее задачам подстройки.

7. Результаты экспериментальных исследований

Отработка положений, моделей, методов и инструментальных средств рационального управления осуществлялась посредством экспериментальных исследований как отдельных функциональных блоков, так и систем управления различными летательными аппаратами.

Большой цикл исследований проведен по тематике НИИ проблем физического моделирования режимов полета самолетов Харьковского авиационного института. В этом НИИ под руководством О.Р. Черановского спроектировано и изготовлено около 30 свободнолетающих моделей и выполнено свыше 300 экспериментальных полетов, позволивших получить данные о поведении проектируемых самолетов в критических режимах полета [9].

Летающие модели представляют собой научно-исследовательский инструмент для получения достоверной информации о характеристиках устойчивости и управляемости на больших углах атаки, при сваливании и в штопоре будущего проектируемого самолета. В экспериментах летающие модели выполняют полет в автоматическом режиме. Для обеспечения такого полета летающие модели оснащаются бортовой аппаратурой и оборудованием, реализующим автоматическое управление аэродинамическими поверхностями в соответствии с программой полета. Информация об угловом положении летающей модели относительно центра масс поступает с блока датчиков, размещенных по осям связанной системы координат. На всех этапах разработки, изготовления и экспериментальных исследований необходимо решать задачи проверки работоспособности блока датчиков угловых положений, выявления причин неработоспособности и восстановления работоспособности. Для автоматизации решения этих задач потребовалось спроектировать блок датчиков как объект рационального управления, обладающий разнотипными избыточными

средствами, обеспечивающими как диагностируемость, так и восстанавливаемость его работоспособности относительно множества дестабилизирующих воздействий.

Типовая структура блока датчиков летающей модели самолета СУ-27 содержит в каждом канале свободные гироскопы СГ-3-2Р и датчики угловых скоростей ДУСУ1-180Б, ДУСМ60. В такой структуре заложено два типа поканальной избыточности. Первая — приборная, так как в каждом канале используется по два датчика угловых скоростей. Вторая — функциональная, обусловленная интегральной зависимостью между углом и угловой скоростью. Для отработки инструментального обеспечения процессов рационального управления разработан стенд датчиков канала курса в соответствии с функциональной схемой (рис. 4).

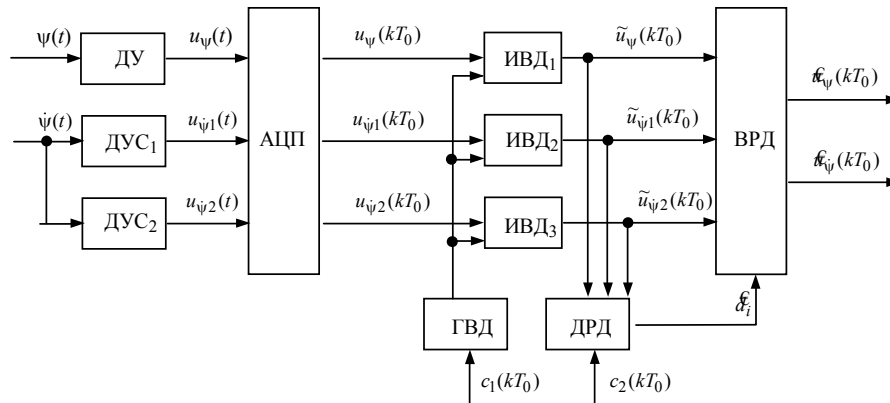


Рис. 4

Напряжения с датчиков угла и угловой скорости, оцифрованные в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), поступают на соответствующие блоки, выполняющие функцию имитации видов дестабилизирующих воздействий (ИВД $_i$, $i = \overline{1, 3}$) по командам с генератора видов дестабилизации (ГВД). ИВД совместно с ГВД по определенным сценариям, задаваемым командой $c_1(kT_0)$, осуществляют деформацию сигналов с датчиков. Деформированные сигналы, соответствующие влиянию текущего дестабилизирующего воздействия на датчик, поступают в блок диагностирования работоспособности датчиков (ДРД), где по косвенным признакам выявляется причина нарушения работоспособности и формируется диагноз \mathcal{F}_i . ДРД включается в работу по команде $c_2(kT_0)$. Результаты диагностирования — диагноз \mathcal{F}_i поступает на блок, выполняющий функцию восстановления работоспособности датчиков (ВРД), где в соответствии с диагнозом с помощью имеющихся средств восстанавливается искаженный дестабилизирующим воздействием \mathcal{F}_i сигнал и формируются оценочные значения дискретных отсчетов напряжения $\mathcal{K}_{\psi}(kT_0)$ и $\mathcal{K}_{\dot{\psi}}(kT_0)$.

На рис. 5 представлен общий вид стенда для исследования датчиков курса в режимах программной имитации видов дестабилизации и восстановления измерений.

В процессе экспериментальных исследований имитировалось по 9 типовых видов дестабилизации для каждого датчика, т.е. 36 видов для всех датчиков канала курса. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о конструктивности принципа управления по диагнозу и продуктивности инструментальных средств рационального управления применительно к задачам обеспечения работоспособности датчиков [10–14].

В космическом полете на ЛА оказывают внешнее возмущающее воздействие гравитационные, магнитные, аэродинамические, электрические, солнечные и другие силы и моменты. Для парирования таких возмущающих воздействий в целях поддержания требуемой ориентации используют исполнительные органы, создающие реактивные моменты для сохранения момента количества движения космического аппарата. В качестве исполнительных органов нашли применение электромаховичные приводы,

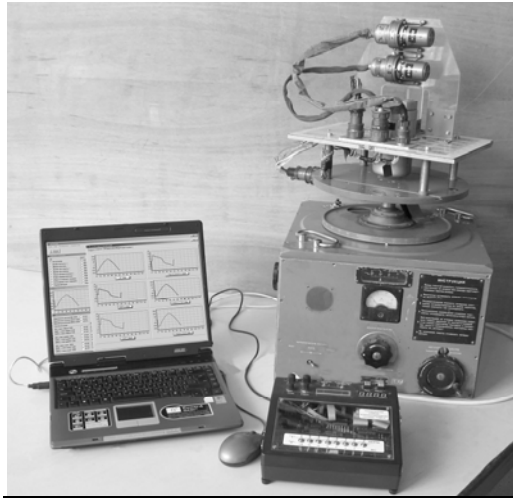


Рис. 5

из которых конструируют блоки приводов, создающих управляемые векторы реактивных моментов. Структура из трех таких приводов, размещенных по осям связанной ортогональной системы координат, позволяет парировать только внешние возмущающие воздействия. Блоки с избыточной структурой электромаховичных приводов позволяют парировать и внутриблочные возмущающие воздействия. Для придания таких свойств блокам приводов с избыточной структурой требуется так их сконструировать, чтобы не только обеспечить необходимые и достаточные условия их работоспособности в номинальных режимах функционирования, но и поддержать работоспособность в нештатных режимах. Использование принципа управления по диагнозу позволяет обеспечить работоспособность блока электромаховичных приводов как при внешних, так и внутренних возмущающих воздействиях.

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован блок электромаховичных приводов пирамидальной структуры (рис. 6). Здесь H_1 и H_4 — векторы кинетических моментов, создаваемых электромаховичными приводами; α_1 и β_1 — углы установки приводов относительно осей связанной системы координат космического аппарата. Блок приводов размещен в кардановом подвесе исследовательского макета (рис. 7).

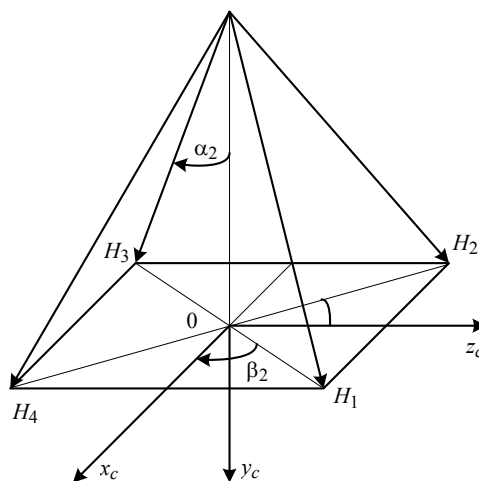


Рис. 6

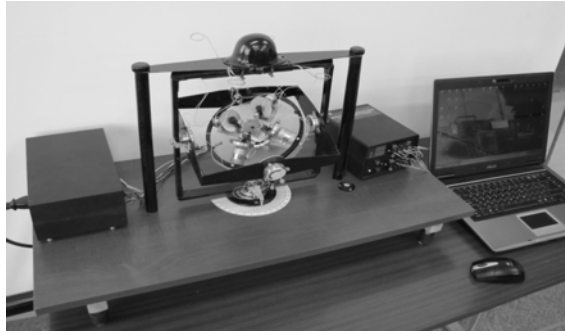


Рис. 7

ЭД — электродвигатель; М — маховик; ТГ — тахогенератор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ОРУ — объект рационального управления; УРУ — устройство рационального управления; $u_z(kT_0)$ — задающее воздействие; $u_{UM}(kT_0)$ — напряжение с УМ; $\omega(t)$ — угловая скорость ЭД; $m(t)$ — кинетический момент; $u_{TG}(t)$ — напряжение тахогенератора; D_1, D_2 и D_3 — множества видов дестабилизации УМ, ЭД и ТГ соответственно.

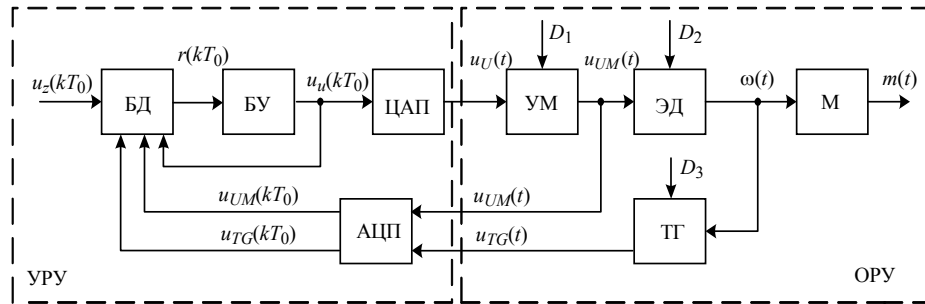


Рис. 8

На рис. 9 представлен пример экранной формы результатов работы блоков диагностирования и восстановления работоспособности системы позиционирования кинетического момента при дестабилизирующих воздействиях. Фрагментарные результаты временных затрат на стенде при диагностировании и восстановлении работоспособности представлены в табл. 2.

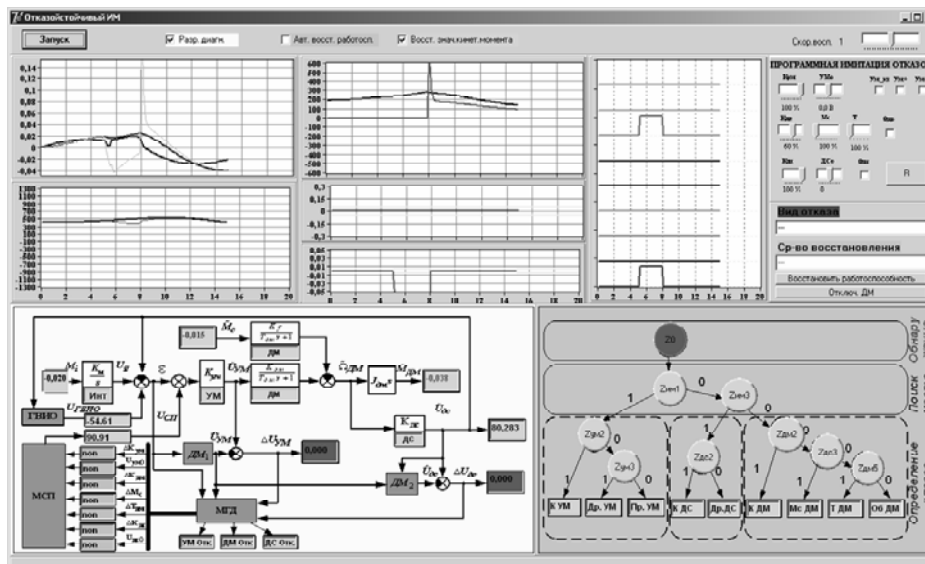


Рис. 9

Из табл. 2 следует, что среднее время диагностирования — 0,34 с, а среднее время восстановления функционального состояния — 1,15 с. Таким образом, среднее время, затрачиваемое на диагностирование и восстановление работоспособности системы позиционирования момента, составило в экспериментах 1,49 с. Это намного меньше времени переходного процесса системы позиционирования момента в штатном режиме ($t_{pp} = 9$ с), что свидетельствует о принципиальной возможности диагностировать и парировать нештатные ситуации в блоке электромаховичных приводов в реальном масштабе времени. Это подтверждено и рядом диссертационных исследований по данной тематике [15, 16].

Таблица 2

№ п/п	Вид дестабилизирующего воздействия	Длительность, С		
		диагностирования	восстановления	реконструкции
1	Уменьшение κ_{UM} на 30 %	0,22	1,27	1,49
2	Дрейф нуля УМ $u_{UM0} = 0,3 B$	0,22	1,15	1,37
3	Увеличение m_c на 40 %	0,22	0,81	1,03
4	Увеличение T_{ED} на 35 %	0,32	0,72	1,04
5	Увеличение κ_{ED} на 25 %	0,18	1,97	2,15
6	Обрыв питания в ЭД	0,37	1,17	1,54
7	Уменьшение осевого момента инерции на 20%	0,85	0,93	1,78

Популярным классом ЛА в настоящее время представляются автономные беспилотные малогабаритные аппараты вертикального взлета и посадки. При их практическом использовании действует ряд дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению работоспособности аппарата. Например, повреждение аэродинамических поверхностей и корпуса при столкновении с препятствиями (деревьями, зданиями, линиями электропередач и другими), заклинивание управляемых аэродинамических поверхностей, потеря управляемости аппарата при столкновении с препятствиями и ряд других. Такие дестабилизирующие факторы приводят как к ухудшению работоспособности аппарата, так и к ее потере, т.е. к нештатным ситуациям. В большинстве ситуаций сохранить аппарат можно с помощью рационального управления по диагнозу.

Для исследования потенциальных возможностей рационального управления автономными малогабаритными ЛА вертикального взлета и посадки были изготовлены макетные образцы аппаратов такого класса. На рис. 10 представлено дискообразное летающее изделие, в котором для дополнительной подъемной силы использовался эффект Коанда. На этом изделии производилась отработка ряда алгоритмов рационального управления угловой стабилизацией [17].

На рис. 11 представлен макетный образец маневренного автономного летающего изделия вертикального взлета. На этом изделии отработывались принципы рационального управления центром масс и ориентацией при полетах в закрытом пространстве [18].

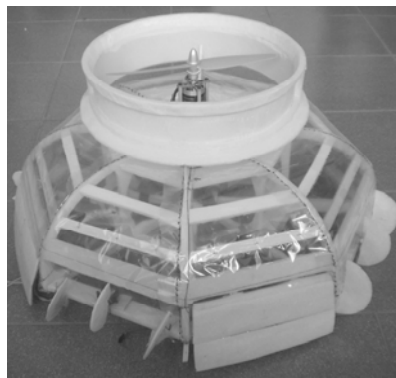


Рис. 10

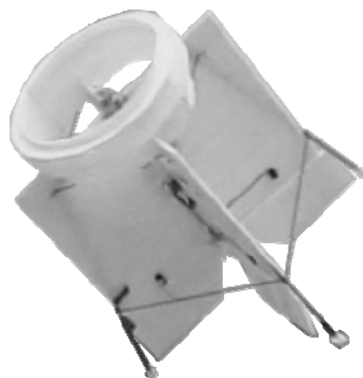


Рис. 11

На рис. 12 представлен макетный образец ударостойкого автономного маневренного изделия вертикального взлета в кардановом подвесе. На этом изделии отрабатываются принципы обеспечения живучести посредством рационального управления пространственным движением в условиях закрытого пространства.



Рис. 12

Проведенные серии экспериментальных исследований на различных макетных образцах ЛА позволили следующее.

1. Подтвердить правомерность основных гипотез и положений рационального управления объектами аэрокосмической техники.

2. Сформировать технологию построения иерархии конструктивных линейных диагностических моделей, отражающих формальную связь косвенных диагностических признаков с прямыми диагностическими.

3. Проверить продуктивность критериев структурной и сигнальной диагностируемости по диагностическим моделям при решении задач диагностирования в реальном масштабе времени.

4. Сформировать аналитико-экспериментальный подход к формированию базы знаний диагностирования объектов автоматического рационального управления на всех этапах жизненного цикла.

5. Установить практическую возможность получения полного диагноза с помощью использования сбалансированных дихотомических деревьев.

6. Оценить эффективность подхода к формированию машинных процедур восстановления работоспособности объектов рационального управления посредством сигнальной и параметрической подстроек, а также реконфигурации алгоритмов и аппаратуры.

7. Убедиться в продуктивности использования принципа управления по диагнозу для организации рационального управления в реальном масштабе времени в условиях неопределенности дестабилизирующих воздействий.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по освоению принципа управления по диагнозу позволили убедиться в возможности для автономных летательных аппаратов практической реализации управления, базирующегося на рациональном сочетании формализованных и слабоформализованных моделей, отражающих процессы диагностирования и восстановления работоспособности.

Расширение и углубление дальнейших теоретических исследований возможно по следующим направлениям.

1. Разработка диагностических моделей для нелинейных объектов рационального управления.
2. Модификация критериев структурной и сигнальной диагностируемости для нелинейных диагностических моделей.
3. Разработка алгоритмического обеспечения для оперативного диагностирования в реальном масштабе времени.
4. Разработка адаптивных алгоритмов формирования знаний об апостериорных дестабилизирующих воздействиях.
5. Автоматическое формирование новых ветвей дихотомического дерева поиска видов дестабилизации на основании новых апостериорных знаний.
6. Обоснованное формирование объемов избыточных средств восстановления работоспособности и алгоритмов их эффективного использования в целях увеличения времени активного функционирования автономных летательных аппаратов.
7. Совершенствование критериальных оценок качества функционирования систем рационального управления в условиях априорных и апостериорных дестабилизирующих воздействий.

Повысить результативность теоретических исследований можно посредством организации и проведения масштабных экспериментов на перспективных образцах автономных летательных аппаратов.

A.C. Kulik

РАЦІОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ АВТОНОМНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. Частина 2

Запропоновано структурування процесів відновлення працездатності за діагнозом. Описано основні задачі відновлення: вибір засобів відновлення, сигнальне і параметричне підстроювання, реконфігурація алгоритмів та апаратури. Представлено методи можливого їх вирішення. Розглянуто об'єкти експериментальних досліджень.

A.S. Kulik

RATIONAL CONTROL OF THE OPERABILITY OF AUTONOMOUS AIRCRAFTS. Part II

Structurization of operability restoration processes on the basis of diagnosis is proposed. The basic are recovery tasks described as follows: recovery tool selection, signal and parametric adjustments, algorithms and hardware reconfiguration. Methods of the tasks possible solution are considered. Objects of experimental study are presented.

1. *Кулик А.С.* Рациональное управление работоспособностью автономных летательных аппаратов. Часть 1 // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». — 2017. — № 3. — С. 25–39.
2. *Кунцевич В.М.* Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. — Киев : Наук. думка, 2006. — 261 с.
3. *Рутковский В.Ю., Земляков С.Д., Суханов В.М., Глумов В.М.* Некоторые новые направления развития теории и применения адаптивного координатно-параметрического управления // Проблемы управления. — 2003. — Вып. 2. — С. 2–10.
4. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. — 2009. — Вып. 10. — С. 35–44.

5. *Hajiyev C., Caliskan F.* Fault diagnosis and reconfiguration in flight control systems. — New York : Springer Science+Business Media. — 2003. — 342 p.
6. *Isermana R.* Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance. — Berlin; Heidelberg ; Springer-Verlag. — 2006. — 475 p.
7. *Noura H., Theillil D., Ponsart I., Chamseddine A.* Fault-tolerant control systems. Design and practical applications. — London : Springer-Verlag. — 2009. — 231 p.
8. *Кунцевич В.М., Лычак М.М.* Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова. — М. : Наука, 1977. — 400 с.
9. *Черановский О.Р.* Мечты и реальность или путь в науку. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2010. — 87 с.
10. *Черановский О.Р., Кулик А.С., Садовничий С.Н.* Автоматизация диагностирования систем управления летающих моделей при стендовых испытаниях: учеб. пособие. — Харьков : Харьковский авиационный институт, 1990. — 84 с.
11. *Kulik A., Kozij A.* Sensor unit fault — toleration enhancement by means of failure diagnosis and serviceability restoration // Proc. IFAC Workshop on Intelligent Autonomus Vehicles. Southampton, UK. — 1993. — P. 515–521.
12. *Kulik A., Kozij A.* Systems fault — tolerant support for a gyroscopic — sensor unit // Engineering Simulation. — 1996. — **13**. — P. 955–966.
13. *Разинькова Н.П.* Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых положений беспилотных самолетов: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 1998. — 164 с.
14. *Златкин О.Ю.* Модели и методы начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы для обеспечения точности выведения ракеты-носителя с транспортного самолета: Дис... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2009. — 168 с.
15. *Лученко О.А.* Модели и методы активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2012. — 173 с.
16. *Таран А.Н.* Обеспечение активной отказоустойчивости объекта автоматической ориентации и стабилизации с двигателями-маховиками: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 175 с.
17. *До К.Т.* Модели и методы обеспечения активной отказоустойчивости угловой стабилизации дискообразного летающего изделия: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2010. — 201 с.
18. *Неуен В.Т.* Обеспечение отказоустойчивости системы управления маневренным автономным летающим изделием на доэволютивных скоростях: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2013. — 196 с.

Получено 20.02.2017