УДК 629.7.062 : 681.518.2

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПОДСТРОЕК

В.В. Нарожный, С.Н. Фирсов, И.В. Бычкова
(Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»)

В данной статье предлагается метод, позволяющий синтезировать алгоритмы параметрических подстроек для обеспечения активной отказоустойчивости системы управления беспилотного летательного аппарата.

алгоритмы параметрических подстроек, отказоустойчивость системы, беспилотный летательный аппарат

Введение. В настоящее время во всем мире ведутся работы по усовершенствованию существующих и разработка новых беспилотных летательных аппаратов, а также фундаментальные и поисковые исследования, направленные на изучение нетрадиционных конструкций и принципов полета. Возросшая тенденция к увеличению числа беспилотных летательных аппаратов, а также расширение сферы их использования в авиации и космонавтике позволит в перспективе выйти на создание высоконадежных, пространственно распределенных интеллектуальных макросистем, способных решать широкий спектр задач, при оптимальном соотношении цены и качества и без риска для человека. Процесс совершенствования функциональных возможностей техники неразрывно связан с повышением задач обеспечения ее надежности, жизнеспособности, безопасности и отказоустойчивости.

Перспективным подходом к обеспечению отказоустойчивости, является системный подход, позволяющий обеспечивать активную отказоустойчивость систем автоматического управления (САУ) беспилотных летательных аппаратах (БПЛА).

Постановка задачи. В системном подходе к обеспечению отказоустойчивости систем управления предлагается раскрыть целостность системы и ее механизмов, обозначить разнообразие типов связей, установить влияние разных отказов, построить модели работоспособного и неработоспособного состояний, связать все и восстановить работоспособность. Влияние компенсируемых отказов на выходные сигналы систем автоматического управления (САУ) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а, следовательно, и на работу, и на работоспособность можно парировать путем использования подстраиваемых параметров, предусмотренных в САУ или введенных дополнительно для обеспечения отказоустойчивости. Параметрическая подстройка должна производиться с применением определенных алгоритмов, использующих информацию о качестве функционирования всей САУ БПЛА, причем таким образом, чтобы обеспечить восстановление работоспособности за приемлемое время и с требуемой степенью точности.

Материалы исследований. Рассмотрим метод синтеза алгоритма параметрической подстройки на основании положений дискретного аналога второго метода Ляпунова, позволяющего получать условия асимптотической устойчивости в некоторой области или в целом при появлении компенсируемых отказов в системе управления. Второй (или прямой) метод Ляпунова сводится к построению специальной вспомогательной скалярной функций, называемой функцией Ляпунова $V[\Delta(k)]$, и изучению ее свойств, а также свойств ее первой разности $V[\Delta(k) + 1]$, определенной вдоль траектории системы. Рассмотрим построение алгоритма параметрической подстройки на примере системы с одним входом и выходом, возмущенное поведение которой описывается следующим уравнением выхода:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + \lambda(k) b u(k), \tag{1}$$

где $\Delta y(k)$ – отклонение выхода САУ БПЛА от эталонного значения в к-й момент времени; $\Delta y(k+1)$ – отклонение выхода САУ БПЛА от эталонного значения в (k + 1)-й момент времени; G – матрица фильтра Люенбергера соответствующей размерности; $\lambda(k)$ – подстраиваемый коэффициент САУ БПЛА; b – матрица управления; u(k) – управляющее воздействие к-й момент времени.

Качество восстановления работоспособности САУ БПЛА, применением параметрической подстройки оценим с помощью функции:

$$V[\Delta y(k)] = \Delta y^T(k)\, Q \Delta y(k) \qquad \left(Q = Q^T > 0\right). \tag{2}$$

Функция $V[\Delta y(k)]$ при $\Delta y(k) = 0$ и $V[\Delta y(k)] > 0$ для $\forall \Delta y(k) \in \Omega_{\Delta y}$, где $\Omega_{\Delta y}$ – множество точек односвязной конечной области пространства состояния системы, содержащей в себе начало координат и некоторую ее конечную окрестность, является определенно положительной.

В соответствии с дискретным аналогом второго метода Ляпунова определим первую разность функции (2), как

$$\Delta V[k, k+1] = V[\Delta y(k+1)] - V[\Delta y(k+1)] = \Delta y^T(k+1) Q \Delta y(k+1) - \Delta y^T(k) Q \Delta y(k). \tag{3}$$

После подстановки в выражение первой разности (3) соответствующих отклонений выходного сигнала САУ БПЛА (1) и выполнения ряда преобразований, получено:

$$\Delta V[k, k+1] = \Delta y^T(k)\left[G^T Q G - Q\right]\Delta y(k) + \lambda(k)\left[2u(k) b^T Q G \Delta y(k) + \lambda(k) u^2(k) b^2 Q B\right]. \tag{4}$$

Согласно теореме устойчивости для того, чтобы динамическая система (1) была асимптотически устойчивой в области $\Omega_{\Delta y}$, достаточно обеспечить функции $\Delta V[k, k+1]$ следующие свойства: $V[\Delta y(k)]$ при $\Delta y(k) = 0$ и $V[\Delta y(k)] < 0$ для $\forall \Delta y(k) \in \Omega_{\Delta y}$, которые характерны для определенно отрицательной функции.

Очевидно, что первое слагаемое функции (4) будет обеспечивать ее определенную отрицательность, если:

$$G^T QG - Q = -P, \quad \left(P = P^T > 0\right). \tag{5}$$

Также, одно из возможных условий, при котором второе слагаемое обеспечивает $\Delta V[k, k+1]$ требуемые свойства, состоит в следующем:

$$\lambda(k)\left[2u(k)b^T QG\Delta y(k) + \lambda(k)u^2(k)b^2 QB\right] = 0. \tag{6}$$

Для выполнения первого условия (5) задают диагональную квадратную положительную матрицу $P = P^T > 0$ и вычисляют исходя из равенства (5) матрицу Q, удовлетворяющую требованию $Q = Q^T > 0$. Выполнение второго условия (6) связано с выбором значения подстраиваемого параметра $\lambda(k)$, обеспечивающего нулевого значения суммы двух слагаемых в области $\Omega_{\Delta y}$. Разрешив равенство (6), относительно скалярной функции $\lambda(k)$, получены следующие значения:

$$\lambda(k) = 0; \tag{7}$$

$$\lambda(k) = -2\left[b^T Qb\right]^{-1} u^{-1}(k) b^T QG\Delta y(k). \tag{8}$$

Первое решение (7) – тривиальное и физически не приемлемо. Второе решение (8) приемлемо с практической точки зрения и, по сути, является $\lambda(k)$ алгоритмом подстройки регулируемого параметра $\lambda(k)$ по значениям отклонения $\Delta y(k)$. Такой алгоритм обеспечивает в области $\Omega_{\Delta y}$ асимптотическую устойчивость САУ БПЛА, при возникновении парируемого отказа, вызвавшего появление отклонения $\Delta y(k)$. Для разработанного алгоритма параметрической подстройки справедлива следующая оценка качества [1]:

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} \Delta y^T(k) P\Delta y(k) \le \Delta y^T(k_0) P\Delta y(k_0). \tag{9}$$

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

В ряде практических случаев подстрочный коэффициент располагают таким образом, что его изменение влияет на переходной режим системы. Тогда отклонение выходного сигнала системы (1) для одного подстраиваемого коэффициента, можно представить следующим уравнением:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + \mu(k) a_i x_i(k)\,, \quad \Delta y \in \Omega_{\Delta y}\,, \tag{10}$$

где a_i – n-мерный вектор столбец, все компоненты которого нулевые, кроме одного: $a_{ij} = e_i^T A e_j$, e_i, e_j – единичные орты; A – матрица состояния системы при номинальном режиме функционирования; $x_i(k)$ – i-й компонент вектора состояния системы X(k).

Для синтеза алгоритма подстройки параметра $\mu(k)$ используем те же предположения, что и для $\lambda(k)$, в результате чего получено:

$$\mu(k) = -2\left[a_i^T Q a_i\right]^{-1} x_i(k) a_i^T Q G \Delta y(k)\,. \tag{11}$$

Зависимость (11) представляет собой алгоритм параметрической подстройки параметра $\mu(k)$, который обеспечивает парирование отказа вызвавшего отклонение $\Delta y(k)$.

Произвольность в выборе функции Ляпунова позволяет получать различные решения задачи параметрической подстройки. Рассмотрим возмущенное состояние САУ БПЛА (1) в виде диагностической BL-модели [2]:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + \Delta A(\gamma_i)\tilde{y}(k) + \Delta B(\gamma_i) u(k)\,, \quad \Delta y \in \Omega_{\Delta y}\,, \tag{12}$$

где $\Delta A(\gamma_i) \approx \dfrac{\partial A}{\partial \gamma_i}$; $\Delta B(\gamma_i) \approx \dfrac{\partial B}{\partial \gamma_i}$; A – матрица состояния системы; B – матрица управления; γ_i – обобщенный параметр i-го отказа.

В результате диагностирования устанавливают причину появления отклонений матриц $\Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i)$. В силу этого обстоятельства можно сформировать такие матрицы $\Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i)$, которые будут осуществлять компенсацию соответствующих отклонений матриц.

Представим динамическую систему (12) в следующем виде:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + \left[\Delta A(\gamma_i) - \Delta A(\gamma_i)\right]\tilde{y}(k) + \left[\Delta B(\gamma_i) - \Delta B(\gamma_i)\right]u(k), \quad \Delta y \in \Omega_{\Delta y}. \tag{13}$$

Введем обозначение: $\eta(k) = \left[\Delta A(\gamma_i) - \Delta A(\gamma_i) \quad \Delta B(\gamma_i) - \Delta B(\gamma_i)\right]\left[\tilde{y}(k) \quad u(k)\right]^T$, на основании которого выражение (13) примет следующий вид:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + \eta(k)\,, \quad \Delta y \in \Omega_{\Delta y}\,. \tag{14}$$

Качество параметрической подстройки будем оценивать функцией следующего вида:

$$V\left[\Delta y(k), \eta(k)\right] = \Delta y^T(k) Q \Delta y(k) + \eta^T(k) Q \eta(k)\,. \tag{15}$$

Первая разность функции (15) после определенных преобразований примет следующий вид

$$\Delta V[k,k+1] = \Delta y^T(k)\left[G^T QG - Q\right]\Delta y(k) + 2\eta^T(k)\,QG\,\Delta y(k) + \eta^T(k+1)\,Q\,\eta(k+1). \quad (16)$$

Для выполнения функцией (16) условия определенной отрицательности в области $\Omega_{\Delta y}$, необходимо обеспечить выполнения ряда условий: 1) $G^T QG - Q = -P$, где $P^T = P > 0$; 2) $\eta(k+1) = \eta(k)$, $\forall k \in T$. Выполнение первого условия означает, что вначале параметрической подстройки необходимо вычислить значения матриц $\Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i)$ используя полученные при диагностировании оценки γ_i или $\Delta\gamma_i$, а затем осуществляем компенсацию параметрических возмущений, вызванных компенсируемыми отказами.

Рассмотрим решение этой же задачи при выборе функции Ляпунова в форме, предложенной в критерии Калмана – Бертрама [3]:

$$V[\Delta y(k)] = \|\Delta y(k)\|. \quad (17)$$

Первая разность $V[k, k+1] = \|\Delta y(k+1)\| - \|\Delta y(k)\|$ в силу уравнения (13) будет определенно отрицательной, если $\Delta A(\gamma_i) = \Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i) = \Delta B(\gamma_i)$. При выполнении этого условия уравнение (13) превращается в автономное $\Delta y(k+1) = G\Delta y(k)$.

Так как матрица выбирается из условия устойчивости BL-модели ($G = \sigma I$, где $|\sigma < 1|$), то $\forall \Delta y_i(k+1) < \Delta y(k+1)$, $i = \overline{1,n}$, $\forall k \in T$.

Таким образом, необходимо так изменять подстраиваемый параметр, чтобы выполнялись следующие условия: $\Delta A(\gamma_i) = \Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i) = \Delta B(\gamma_i)$.

Пример применения параметрической подстройки для компенсирования парируемых отказов. Рассмотрим применение разработанных алгоритмов на примере пневматического сервопривода (ПСП) БПЛА, который отклоняет органы управления для создания управляющих сил и моментов. Обобщенная сема сервопривода представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения: ЗУ – задающее устройство; К – коммутатор; СМ – сумматор; ПУМ – предварительный усилитель мощности с изменяемым коэффициентом усиления; УМ – усилитель мощности; РУМ – релейный усилитель мощности; РМ – рулевая машинка; П – потенциометр обратной связи; КТ – контрольная точка; МПС – микропроцессорная система. Для случая скалярного управления, к которому относится ПСП, отклонения выходных сигналов можно представить уравнением:

$$\Delta y(k+1) = G\Delta y(k) + k_{ПУМ}(k) b_i U_i(k),\ \Delta y(k) \in \Omega_{\Delta y}. \quad (18)$$

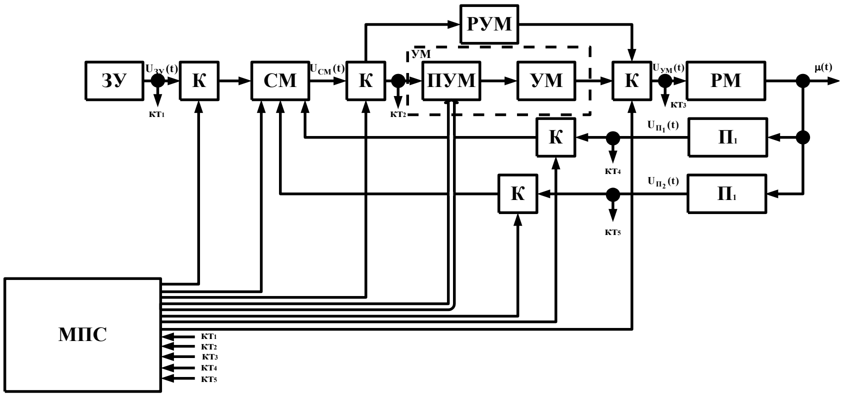

Рис. 1. Обобщенная схема ПСП с активной отказоустойчивостью

В соответствии с дискретным аналогом второго метода Ляпунова получим алгоритм подстройки регулируемого параметра $k_{ПУМ}(k)$ по значениям отклонения Δy:

$$k_{ПУМ}(k) = -2\left[b_i^T Q b_i\right]^{-1} U^{-1}(k) b_i^T Q G \Delta y(k) . \qquad (19)$$

Результаты экспериментального исследования показывают, что алгоритм (19) осуществляет в области $\Omega_{\Delta y}$ парирование парируемого отказа.

Заключение. Синтезированные алгоритмы параметрических подстроек с применением дискретного аналога второго метода Ляпунова позволяют сформировать процедуры, обеспечивающие отказоустойчивость САУ БПЛА по отношению к компенсируемым отказам посредством изменения подстраиваемых параметров, что подтверждено экспериментальными данными. Полученные результаты планируется использовать при построении отказоустойчивых САУ БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кулик А.С. Основы моделирования систем: Учебн. пос. – Х.: ХАИ, 1998. – 90 с.*
2. *Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.*
3. *Методы классической и современной теории автоматического управления: В 3 т. / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимальных систем автоматического управления. – 736 с.*

Поступила 14.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор А.Ю. Соколов,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»