УДК 681.5 : 004.3

ОЦЕНИВАНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННО НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ*

А. З. Асанов[1], **Д. Н. Демьянов**[2]

[1]*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78*
[2]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18*
E-mail: a.z.asanov@yandex.ru

Показано, что задача оценивания неизмеряемых внешних возмущений с математической точки зрения эквивалентна задаче оценивания части переменных состояния расширенного объекта. Предложен алгоритм оценивания неизмеряемых внешних возмущений с использованием функционального наблюдателя и сформулированы условия разрешимости задачи синтеза. Полученное решение основано на применении технологии канонизации матриц.

Ключевые слова: внешние возмущения, оценивание, функциональный наблюдатель, алгоритм синтеза, канонизация матриц.

Введение. Задача компенсации внешних возмущающих воздействий относится к фундаментальным проблемам современной теории автоматического управления. Она является весьма актуальной при управлении по выходу линейными и нелинейными, устойчивыми и неустойчивыми объектами. Необходимость в оценивании и компенсации внешних возмущений возникает, например, при решении задач управления [1–3], контроля параметров и диагностирования [4, 5], идентификации объектов управления [6, 7] и др. Вместе с тем оценка неизмеряемых внешних возмущений — далеко не тривиальная задача. В случае рассмотрения многосвязных динамических систем представляет интерес специальный класс алгоритмов наблюдения [8, 9], получивших название функциональных наблюдателей, особенность которых заключается в восстановлении лишь некоторой линейной комбинации переменных состояния. Построение функциональных наблюдателей для оценки неизмеряемых внешних возмущений, являясь специфическим развитием наблюдателей для систем с сигнальными возмущениями [10], позволит эффективно решать задачи адаптивного [3, 11] и робастного управления [12].

Постановка задачи. Пусть рассматривается динамический объект, описываемый уравнениями в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + Bu + Hw; \quad y = Cx + Dw. \tag{1}$$

Здесь $x \in R^n$, $u \in R^s$, $y \in R^m$, $w \in R^k$ — векторы состояния, управления, выхода и внешних возмущений; A, B, C, H, D — числовые матрицы соответствующих размеров. Предполагается, что все матрицы коэффициентов известны, векторы состояния и внешних возмущений недоступны непосредственному измерению, векторы управления и выхода могут

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-00651).

быть измерены с высокой точностью, все строки матрицы C являются линейно независимыми, $n \geq \max(m, s, k)$.

Требуется синтезировать динамическую систему порядка k, которая формировала бы по известной информации о сигналах y и u вектор $\hat{w}$ такой, что

$$\varepsilon(t) = \hat{w}(t) - w(t) \to 0 \quad \text{при} \ \ t \to \infty. \tag{2}$$

Предварительные соотношения. Для решения поставленной задачи воспользуемся известным подходом, заключающимся в расширении изучаемого объекта путём отнесения к нему процесса формирования вектора внешних возмущений [13].

Предположим, что изменение вектора внешних воздействий подчиняется уравнению

$$\dot{w} = Pw. \tag{3}$$

Тогда, объединив уравнения (1)–(3), получим модель расширенного объекта в пространстве состояний

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & H \\ 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u, \\ y = \begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \end{pmatrix}. \end{cases} \tag{4}$$

Применение известных методов оценивания неизмеряемых внешних возмущений предполагает построение наблюдателя полного порядка или редуцированного наблюдателя Люенбергера [13]. В первом случае размерность наблюдающего устройства составит $n+k$, а во втором — $n+k-m$. Для снижения количества уравнений (и, как следствие, уменьшения требуемых при расчёте вычислительных ресурсов) воспользуемся функциональным наблюдателем, описанным в работе [9].

Для дальнейшего вывода расчётных соотношений будут использоваться технология канонизации матриц и методы решения линейных матричных уравнений, подробное описание которых приведено в работе [14]. Здесь лишь кратко напомним, что суть указанной технологии заключается в том, что некоторой матрице M размера $m \times n$ ставится в соответствие четвёрка матриц $\tilde{M}^L$, $\tilde{M}^R$, $\bar{M}^L$, $\bar{M}^R$, удовлетворяющих равенству

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}^L \\ \bar{M}^L \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} \tilde{M}^R & \bar{M}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\tilde{M}^L$, $\tilde{M}^R$ — левый и правый матричные делители единицы, $\bar{M}^L$, $\bar{M}^R$ — левый и правый матричные делители нуля. Матрица $\tilde{M} = \tilde{M}^R \tilde{M}^L$ называется сводным канонизатором.

Преобразуем второе уравнение системы (4):

$$Cx = y - Dw.$$

Используя общие формулы решения линейных матричных уравнений, получим

$$x = \tilde{C}(y - Dw) + \bar{C}^R \mu, \tag{5}$$

если выполняется условие разрешимости $\bar{C}^L(y - Dw) = 0$. Здесь μ — неизвестный вектор размерности $n - m$.

Согласно принятому ранее допущению все строки матрицы C линейно независимы, следовательно, она не имеет левого делителя нуля и решение (5) существует всегда.

С учётом соотношения (5) уравнение динамики системы (4) может быть записано в новых координатах:

$$\begin{pmatrix} \tilde{C} & \bar{C}^R & -\tilde{C}D \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\mu} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & H \\ 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{C} & \bar{C}^R & -\tilde{C}D \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \mu \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u. \qquad (6)$$

Отметим, что при принятых допущениях матрица перехода к новым координатам является невырожденной. Для доказательства этого представим матрицу перехода в виде произведения:

$$\begin{pmatrix} \tilde{C} & \bar{C}^R & -\tilde{C}D \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{C}^R & \bar{C}^R \end{bmatrix} & -\tilde{C}D \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{C}^L & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}.$$

Учитывая свойства делителей нуля и канонизаторов, а также отсутствие левого делителя нуля матрицы C, можно показать, что матрицы-сомножители в правой части приведённого выше равенства являются квадратными невырожденными. Следовательно, матрица перехода в левой части также является квадратной невырожденной.

Обозначим символом T невырожденную блочную матрицу $T = \begin{pmatrix} \tilde{C} & \bar{C}^R \end{pmatrix}$.

Умножим обе части уравнения (6) на невырожденную матрицу и запишем результат с учётом принятого обозначения:

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\mu} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^{-1} & T^{-1}\tilde{C}D \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & H \\ 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T & -\tilde{C}D \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \mu \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T^{-1} & T^{-1}\tilde{C}D \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u.$$

Проведя преобразования матриц коэффициентов, получим

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\mu} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^{-1}AT & T^{-1}H + T^{-1}\tilde{C}DP - T^{-1}A\tilde{C}D \\ 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \mu \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T^{-1}B \\ 0 \end{pmatrix} u.$$

Для повышения удобства записи последующих операций введём обозначения:

$$T^{-1}AT = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \; T^{-1}H + T^{-1}\tilde{C}DP - T^{-1}A\tilde{C}D = \begin{pmatrix} A_{13} \\ A_{23} \end{pmatrix}, \; T^{-1}B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}. \qquad (7)$$

Тогда динамика расширенного объекта в новых координатах будет описываться матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\mu} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \mu \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \end{pmatrix} u. \qquad (8)$$

Таким образом, получена модель, представляющая изменение состояния расширенного объекта в новых координатах. При этом новый вектор состояния включает в себя три составляющие: измеряемый выход, неизмеряемые вспомогательные переменные, внешние возмущения. Отметим, что для решения поставленной задачи достаточно будет оценивать только третью из перечисленных составляющих.

Синтез наблюдающего устройства. Сформируем уравнение динамики наблюдающего устройства, выделив из системы (8) третье уравнение и дополнив его рассогласованием между реальным значением вектора внешних возмущений и его оценкой:

$$\dot{\hat{w}} = P\hat{w} + L(A_{13}w - A_{13}\hat{w}).$$

Определив реальное значение вектора $A_{13}w$ из первого уравнения системы (8), получим уравнение наблюдающего устройства

$$\dot{\hat{w}} = (P - LA_{13})\hat{w} - LA_{11}y - LA_{12}\mu - LB_1u + L\dot{y}. \tag{9}$$

Так как вектор μ недоступен непосредственному измерению, его следует исключить из уравнения динамики наблюдателя. Для этого должно выполняться условие $LA_{12} = 0$, откуда $L = \eta\bar{A}_{12}^L$, где η — некоторая произвольная матрица соответствующего размера.

Тогда уравнение (9) может быть представлено в виде

$$\dot{\hat{w}} = (P - \eta\bar{A}_{12}^L A_{13})\hat{w} - \eta\bar{A}_{12}^L A_{11}y - \eta\bar{A}_{12}^L B_1u + \eta\bar{A}_{12}^L\dot{y}. \tag{10}$$

Объединив уравнение (10) и третье уравнение системы (8), запишем выражение для динамики ошибки оценивания

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\hat{w}} - \dot{w} = (P - \eta\bar{A}_{12}^L A_{13})\varepsilon.$$

Если пара $(P, \bar{A}_{12}^L A_{13})$ полностью наблюдаема по Калману, то выбором матрицы η можно обеспечить любую требуемую динамику процесса оценивания.

В случае если непосредственное дифференцирование выходного сигнала не допускается по тем или иным причинам, можно модифицировать расчётную схему.

Введём переменную $\chi = \hat{w} - \eta\bar{A}_{12}^L y$. Тогда уравнение (10) будет иметь вид

$$\dot{\chi} = (P - \eta\bar{A}_{12}^L A_{13})\chi + [(P - \eta\bar{A}_{12}^L A_{13})\eta\bar{A}_{12}^L - \eta\bar{A}_{12}^L A_{11}]y - \eta\bar{A}_{12}^L B_1u. \tag{11}$$

При этом оценка вектора внешних возмущений определяется уравнением

$$\hat{w} = \chi + \eta\bar{A}_{12}^L y. \tag{12}$$

Построенный наблюдатель, описываемый уравнением (10) или уравнениями (11), (12), имеет порядок k и позволяет асимптотически оценивать интересующий нас вектор внешних возмущений при условии наблюдаемости пары $(P, \bar{A}_{12}^L A_{13})$.

Следует отметить, что необходимым условием построения наблюдателя является существование левого делителя нуля матрицы A_{12}, имеющей m строк и $n - m$ столбцов. Таким образом, если $m > n - m$, то существование матрицы $\bar{A}_{12}^L$ обеспечено, в противном случае её существование не гарантируется. Иными словами, для построения наблюдателя внешних возмущений практически всегда требуется измерение более чем половины переменных состояния исходного объекта.

В частном случае возмущающее воздействие может быть постоянной величиной, при этом матрица P в уравнении (3) тождественно равна нулю. Тогда матрица динамики наблюдателя будет задаваться выражением

$$A^* = -\eta\bar{A}_{12}^L A_{13}.$$

Для обеспечения асимптотического процесса оценивания все собственные числа матрицы A^* должны иметь отрицательную действительную часть, а, значит, сама матрица должна быть невырожденной квадратной матрицей размера k. Проанализируем условие, при котором это становится возможным.

Матрица A^* является произведением трёх матриц размера $k \times r$, $r \times m$ и $m \times k$, где r — некоторое число, большее или равное $2m-n$. Известно [15], что ранг произведения матриц не превосходит наименьший из рангов матриц-сомножителей, т. е. $\mathrm{rank} A^* \leq \min(k, r, m)$. Следовательно, должны выполняться неравенства $k \leq m$, $k \leq 2m-n$ (это является необходимым, но не достаточным условием разрешимости задачи). Иными словами, для асимптотического оценивания постоянного возмущающего векторного сигнала требуется, чтобы количество возмущающих воздействий было меньше количества измеряемых выходов, при этом измерению должны быть доступны более половины переменных состояния исходного объекта.

Обобщённый алгоритм синтеза наблюдающего устройства. С учётом полученных соотношений можно сформулировать в общем виде алгоритм аналитического синтеза функционального наблюдателя внешних возмущений.

Пусть заданы числовые матрицы коэффициентов из уравнений (1) и (3), а также область комплексной плоскости, в которой должны располагаться собственные числа матрицы динамики наблюдателя.

Решение задачи может быть найдено по результатам выполнения следующих этапов:

1. Провести канонизацию матрицы C и вычислить матрицу T.

2. Определить коэффициенты уравнения (8) по формулам (7).

3. Вычислить $\bar{A}_{12}^L$. Если $\bar{A}_{12}^L = \oslash$, то задача не разрешима и следует завершить алгоритм, в противном случае можно перейти к следующему этапу.

4. Вычислить матрицу $\bar{A}_{12}^L A_{13}$ и оценить наблюдаемость пары $(P, \bar{A}_{12}^L A_{13})$. Если указанная пара не наблюдаема, то предложенный алгоритм для решения задачи не применим, в противном случае можно перейти к следующему этапу.

5. Решить задачу модального управления, определив матрицу η такую, что все собственные числа матрицы $P - \eta \bar{A}_{12}^L A_{13}$ располагаются в требуемой области комплексной плоскости.

6. Если дифференцирование выходного сигнала допускается, то уравнение наблюдателя имеет вид (10), в противном случае — (11), а оценка внешнего возмущения находится по формуле (12).

Когда внешнее возмущение полагается постоянным, матрица P при расчётах принимается равной нулю.

Пример. Пусть некоторый динамический объект описывается системой уравнений в пространстве состояний вида (1), при этом матрицы коэффициентов принимают следующие значения:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1{,}000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0{,}072 & 2{,}054 & 3{,}019 & 0 \\ 0 & -6{,}608 & -0{,}100 & 0 & 10{,}207 \\ 0 & -327{,}100 & 0 & -42{,}000 & 0 \\ 0 & 0 & -489{,}900 & 0 & -87{,}500 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 18{,}000 & 0{,}117 & 0{,}351 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0{,}792 & 35{,}000 & 0{,}478 \\ 0{,}317 & 0{,}948 & 50{,}000 \end{pmatrix},$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}377 \\ 0 \\ -0{,}680 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1{,}000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}000 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Известно, что на объект оказывает воздействие кусочно-постоянное внешнее возмущение, амплитуда которого неизвестна и изменяется каждые 2 секунды. Требуется построить наблюдатель неизмеряемого внешнего воздействия при условии, что дифференцирование выходного сигнала не допускается.

Проанализируем предварительно поставленную задачу. Размерность динамического объекта $n = 5$, число измеряемых переменных $m = 3$, размерность вектора внешних возмущений $k = 1$. Следовательно, вектор состояния расширенного объекта состоит из шести элементов, построенный для него наблюдатель полного порядка также будет иметь размерность 6, а размерность наблюдателя Люенбергера равна 3. В то же время применение функционального наблюдателя позволит оценивать внешнее возмущение с помощью уравнения первого порядка.

Учитывая длительность импульсов возмущающего сигнала, потребуем, чтобы полюс наблюдателя располагался в точке комплексной плоскости с координатой $(-10,\, 0j)$. Так как внешнее возмущение полагается постоянным, коэффициент P в уравнении (3) равен нулю.

Для решения поставленной задачи воспользуемся вышеизложенным алгоритмом.

1. Проведём канонизацию матрицы C (здесь и далее использовались программные средства из работы [16]) и вычислим матрицу T:

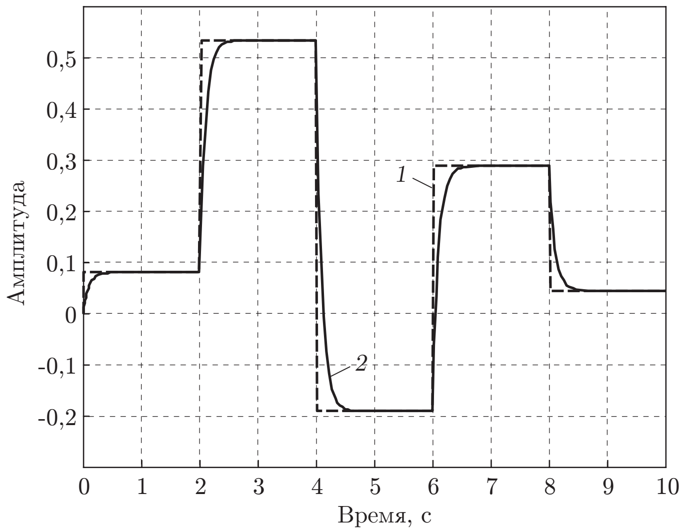
$$\bar{C}^L = \varnothing, \quad \tilde{C}^L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\bar{C}^R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{C}^R = \tilde{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2. Найдём коэффициенты уравнения (8) по формулам (7):

$$T^{-1}AT = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & | & 1{,}000 & 0 \\ 0 & -0{,}100 & 0 & | & -6{,}608 & 10{,}207 \\ 0 & 0 & -42{,}000 & | & -327{,}100 & 0 \\ --- & --- & --- & --- & --- & --- \\ 0 & 2{,}054 & 3{,}019 & | & -0{,}072 & 0 \\ 0 & -489{,}900 & 0 & | & 0 & -87{,}500 \end{pmatrix},$$

$$T^{-1}H + T^{-1}\tilde{C}DP - T^{-1}A\tilde{C}D = \begin{pmatrix} A_{13} \\ A_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0{,}680 \\ --- \\ -0{,}377 \\ 0 \end{pmatrix},$$



Графики изменения с течением времени возмущающего воздействия (*1*) и его оценки (*2*)

$$T^{-1}B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0{,}792 & 35{,}000 & 0{,}487 \\ --- & --- & --- \\ 18{,}000 & 0{,}117 & 0{,}351 \\ 0{,}317 & 0{,}948 & 50{,}000 \end{pmatrix}.$$

3. Вычислим левый делитель нуля матрицы A_{12}: $\bar{A}_{12}^L = \begin{pmatrix} 327{,}100 & 0 & 1{,}000 \end{pmatrix}$.

4. Вычислим $\bar{A}_{12}^L A_{13}$: $\bar{A}_{12}^L A_{13} = -0{,}680$.

5. Определим η из условия $-\eta \bar{A}_{12}^L A_{13} = -10$. Получим $\eta = -14{,}706$.

6. Так как дифференцирование выходного сигнала не допускается, то оценка внешнего возмущения будет определяться системой уравнений вида (11), (12):

$$\dot{\chi} = -10\chi + \begin{pmatrix} 48102{,}941 & 0 & -470{,}588 \end{pmatrix} y + \begin{pmatrix} 11{,}647 & 514{,}706 & 7{,}162 \end{pmatrix} u,$$

$$\hat{w} = \chi + \begin{pmatrix} -4810{,}294 & 0 & -14{,}706 \end{pmatrix} y.$$

Для проверки корректности полученных результатов было проведено цифровое моделирование процесса оценивания с использованием системы компьютерной математики MATLAB. Результаты для нулевых начальных условий представлены на рисунке. Как видно на графике, оценивание внешнего возмущения осуществляется с достаточно высокой точностью и приемлемой скоростью.

Заключение. В данной работе предложен алгоритм аналитического синтеза функционального наблюдателя для оценивания неизмеряемых внешних возмущений путём построения модели расширенного объекта и невырожденного преобразования вектора состояния с использованием технологии канонизации матриц. Полученные результаты могут быть полезны в тех случаях, когда требуется оценивать только величину внешних возмущений без восстановления неизмеряемых переменных состояния объекта для снижения размерности задачи и уменьшения требуемых ресурсов вычислительной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю. и др.** Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера // Автометрия. 2013. **49**, № 6. С. 14–24.
2. **Albertos P., Sala A.** Multivariable Control Systems. N. Y.: Springer, 2004. 340 p.
3. **Асанов А. З., Демьянов Д. Н.** Аналитический синтез физически реализуемых регуляторов для многосвязных объектов на основе технологии вложения // Автометрия. 2012. **48**, № 5. С. 42–49.
4. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем. С.-Пб.: Научное издание, 1998. 256 с.
5. **Bonnick A.** Automotive Computer Controlled Systems. Diagnostic Tools and Techniques. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 252 p.
6. **Izermann R., Munchhof M.** Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 705 p.
7. **Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю.** Идентификация и диагностика систем. М.: Академия, 2009. 352 с.
8. **Коровин С. К., Фомичев В. В., Медведев И. С.** Синтез минимальных функциональных наблюдателей // ДАН. Теория управления. 2005. № 3. С. 316–320.
9. **Асанов А. З., Демьянов Д. Н.** Аналитический синтез функциональных наблюдателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 13–18.
10. **Асанов А. З., Демьянов Д. Н.** Аналитический синтез функциональных наблюдателей для систем с сигнальными возмущениями // Автометрия. 2014. **50**, № 6. С. 111–119.
11. **Асанов А. З.** Аналитическое конструирование адаптивной системы с эталонной моделью // Изв. вузов. Авиационная техника. 2003. № 2. С. 17–21.
12. **Асанов А. З., Ахметзянов И. З., Демьянов Д. Н.** Аналитический синтез робастной системы управления многосвязным объектом с компенсацией возмущений // Тр. IX Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO-2012). М.: ИПУ РАН, 2012. С. 856–867.
13. **Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. С.-Пб.: Наука, 1999. 467 с.
14. **Буков В. Н.** Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во Н. Ф. Бочкаревой, 2006. 720 с.
15. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 560 с.
16. **Асанов А. З., Ахметзянов И. З.** Канонизация матриц произвольного размера средствами MATLAB // Тр. II Всерос. науч. конф. «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». М.: ИПУ РАН, 2004. С. 798–804.

Поступила в редакцию 24 февраля 2015 г.