

УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С КОМПЕНСАТОРАМИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИТЕРАЦИОННО-ИНВЕРСНЫХ МОДЕЛЕЙ

В.И. Кортунюв, канд. техн. наук,

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена задача управления динамическим объектом с восстановлением возмущений на основе линейной модели итерационным методом в пространстве состояния. Восстановленные оценки возмущений или неопределенностей объекта использованы далее в формировании управления. Анализируются свойства систем управления с динамическими компенсаторами возмущений в условиях приближения итерационно-инвертируемых моделей к полной инверсии. Приведен пример робастного управления самолетом при стабилизации угла крена с предложенными компенсаторами.

* * *

Розглядається задача керування динамічним об'єктом зі встановленням збурень на основі лінійної моделі ітераційним методом в просторі стану. Відновлені оцінки збурень або невизначеностей об'єкта використовуються в формуванні керування. Аналізуються властивості систем керування з динамічними компенсаторами збурень в умовах наближення ітераційно-інвертованих моделей до повної інверсії. Наведено приклад робастного керування літаком зі стабілізації кута крену із запропонованими компенсаторами.

* * *

The problem of dynamic object control with disturbances restoration on the basis of linear model by iteration solution in state space is considered. Restored estimations of disturbances or uncertainties are used for control further. The properties of control systems with dynamic compensator of disturbances are analyzed under conditions of approximation of iterative inverse models to exact inverse models. The example of robust control with proposed compensators for aircraft stabilization roll is given.

Введение

Идеи создания систем управления (СУ), свойство которых слабо зависели бы при отклонении параметров объекта от номинальных значений, возникли с началом развития теории автоматического управления и оформлялись в различные направления – теорию инвариантных систем, теорию адаптивных систем, теорию робастных систем, теорию интеллектуальных систем и др. Цель управления объектами, подверженных глубоким параметрическим возмущениям, – это достижение близости требуемого выхода к некоторому желаемому выходу или эталонной модели. Исходя из данной цели управления к СУ предъявляют два основных требования – обеспечение динамических показателей управления в отсутствии возмущений и обеспечение требуемого уровня подавления действующих возмущений.

Достижение данной цели связано с необходимостью решения задач управления и создания эффек-

тивных СУ с выполнением современных требований к ним [1]: минимум априорной информации при проектировании и эксплуатации; высокая надежность и ресурс непрерывной работы; минимальное энергопотребление; оптимальность по выбранному критерию; совместимость с верхним уровнем; низкая стоимость.

В настоящее время известно множество направлений в решении задач управления в условиях действия возмущений, когда априорная информация о них практически отсутствует. Но наибольшее распространение получает направление, связанное с восстановлением и компенсацией возмущений. Идея управления нелинейным и нестационарным объектом по качеству как линейного с компенсацией возмущений, излагалась во множестве работ. Однако для существующих методов строгого доказательства компенсации заданного уровня возмущений либо не проводили, либо демонстрировали только на частных примерах. В данной работе приведены результаты возможной компенсации возмущений как разрешимости

получаемых функциональных уравнений.

Рассмотрим основные методы решения задачи управления объектами в условиях неопределенности возмущений, которые исследованы и описаны, но не всегда удовлетворяют современным требованиям.

Методы комбинированного управления. Комбинированные системы в своей основе используют оба принципа управления – управление по возмущению и по отклонению (обратной связи), и реализуются двухконтурными схемами управления. Возможность непосредственного измерения действующего возмущения остается только для внешних, а внутренние или параметрические возмущения, как правило, невозможно измерить в процессе управления. Теоретическим фундаментом комбинированных систем является теория инвариантности, выводы которой используют в построении таких систем. Можно выделить следующие преимущества комбинированных систем [2]: энергетические преимущества при высокой точности регулирования; возможность получения отрицательного коэффициента статизма при глубоком подавлении возмущения; возможность уменьшения мощности элементов контура обратной связи в пять-десять раз. Теоретическое развитие и создание инженерных методик проектирования комбинированных систем дано в [4]. Однако такие системы осуществимы только при непосредственном контроле возмущений, и они имеют ограниченность при параметрических неопределенностях объекта.

Методы обратных задач динамики. Применение эти методы нашли в задачах расчета программного управления для объектов, осуществляющих движение по известной программной траектории [3]. К достоинству этих методов следует отнести слабую чувствительность к изменению параметров и возмущений и высокую динамическую точность. Недостатки – необходимо иметь информацию о структуре и параметрах полной модели; следует измерять производные вектора состояния; компенсировать ограниченный класс сигналов, согласованных с моделью.

Методы инвариантного управления. Развитие теории инвариантности стимулировалось тем фактом, что возмущения в реальных системах не всегда удовлетворяют условию квазистационарности по отношению к динамике замкнутой системы. Методологической основой инвариантного управления неопределенными объектами являются работы Ивахненко А.Г. (1963)[2]. Поскольку достижение абсолютной, или полной инвариантности носит теоретический характер, то в практике возможно достижение частичной инвариантности, инвариантности до ε и селективной инвариантности.

Наиболее разработанными считаются методы управления с полиномиальными моделями возмущений известного порядка. Оценка возмущений в этом случае формируется как оценка расширенного наблюдателя состояния с помощью модели возмущений, представленной полиномиальной функцией из решения дифференциального или разностного уравнения. Наиболее известной работой в данном классе методов считается работа С. Джонсона [10], в которой возмущения описаны как «волновые», но полиномиального типа. Обобщение полиномиальных или регулярных возмущений дано в работах В.С. Кулебакина [5] по теории К(Д)-изображений как способа обеспечения селективной инвариантности СУ. Различные процедуры синтеза компенсационного управления на основе селективной инвариантности изложены в работах Радченко И.Ф. [8], а сравнение робастных регуляторов на основе селективной инвариантности и применение к различным объектам рассмотрено в работе Е.М. Потапенко [7]. Методы селективной инвариантности имеют некоторое сходство с методами управления, использующими внутренние модели, описанные в работе [12]. Однако некоторые методы компенсационного типа реализуются по двухконтурной схеме на основе выполнения требования структурной реализуемости инвариантного управления Б.Н. Петрова (принципа двухканальности). Тем самым эти методы отличаются от методов с внутренней моделью.

Отметим основные достоинства рассматриваемых методов: не требуется полная информация о возмущениях; возможно достижение абсолютной инвариантности, когда возмущения можно считать внешними. Недостатками можно считать то, что инвариантные системы для некоторых схем оказываются негрубыми, а абсолютная инвариантность реализуема в многоконтурных системах.

Методы управления с восстановлением возмущений (компенсационные методы). Множество методов адаптивного и робастного управления в явной или неявной форме содержат модель возмущений, а также явно или неявно восстанавливают возмущения в целях их компенсации по известной схеме “дифференциальная вилка”, предложенной Костюком О.М. и рассмотренной для построения инвариантных систем в [4]. Последние схемы применения “дифференциальной вилки” уже не отражают ее первоначального названия, а скорее наследуют лишь наличие отрицательной и положительной обратной связи в схеме компенсации возмущений. Характерным для схемы компенсации с “дифференциальной вилкой” является наличие сигнала оценки возмущений по отношению к номинальной модели. Связь асимптотического оценивания переменных состояния расширенной модели объекта путем косвенного измерения возмущений показана в работе [6].

Из разнообразия методов восстановления входных сигналов динамических систем выделим класс методов, работоспособных в режиме реального времени или имеющих рекуррентную алгоритмическую форму. Так, в работе [11] исследуется смешанное оценивание – вначале оценивается вектор состояния фильтром Калмана, а затем оценивается возмущение рекуррентным МНК. Методы построения инверсных фильтров (фильтров, восстанавливающих входные сигналы динамической системы) на основе адаптивных или робастных фильтров [6], имеют структурную вырожденность в важном для практики случае, когда число входных равно числу выходных сигналов. Оценивание входных сигналов со вспомогательной моделью, когда подбирается закон управ-

ления моделью по принципу обратной связи так, что сигналы управления моделью становятся близкими к искомым сигналам, различается способами организации обратной связи [12].

Достоинства таких методов: приближение свойств системы управления к комбинированным системам; возможность обеспечения устойчивости к ошибкам в измерении выходного вектора; возможность разделимости задач синтеза регулятора и компенсатора; применимость методов синтеза и анализа для линейных систем. Недостатки: ограниченность оценки по производной компенсируемого возмущения; наличие модели возмущений в расширенных наблюдателях и чувствительность системы к этой модели.

По анализу рассмотренных методов можно сделать следующие выводы:

Не существует универсального метода решения задачи управления в условиях неопределенности возмущений.

Наиболее перспективными считаем методы, которые используют минимальную априорную информацию, хотя качество решения задачи зависит от количества этой информации.

Качество метода управления в условиях неопределенности определяется качеством решения задачи восстановления (оценивания) возмущений. Если метод обеспечит восстановление действующих возмущений, то он обеспечит и достижение цели управления.

Компенсационное управление перспективно вследствие таких причин:

- реализуется по двухконтурной схеме с возможностью разделения контуров по целям управления: внешний – реализует критерий стабилизации, внутренний – критерий компенсации или уменьшения влияния возмущений;
- при разделении целей по контурам управления уменьшается объем синтеза и анализа СУ;
- по имеющейся текущей информации о возмущениях возможно параллельное решение задач контроля и диагностирования;

▪ системы с компенсацией возмущений могут приближаться по качеству к системам с полной инвариантностью.

Применимость методов инвариантного управления определяется возможностью восстановления вектора возмущения как решение обратной задачи для динамических систем – восстановления входного сигнала по известному выходному. Определенное преимущество в этом направлении имеют итерационные методы, реализуемые в пространстве состояния, вследствие свойств саморегуляризации. В данной работе приведены результаты исследования свойств системы управления, построенной по двухконтурной схеме с восстановлением вектора возмущения итерационно-инверсным фильтром [13-15].

Постановка задачи

Предполагаем, что исследуемый объект описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{x}_o(t) &= f(x_o(t), u(t), v_o(t), \Theta(t), t), x_o(t_0) = x_o^0, \\ y_o(t) &= g(x_o(t), u(t), v_o(t), \Theta(t), t) + \xi(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_o(t)$ - вектор состояния размерности $dim(x_o) = n_x^o$; x_o^0 - вектор начального состояния; $y_o(t)$ - вектор выхода размерности $dim(y_o) = n_y^o$; $u(t)$ - вектор управления размерности $dim(u) = n_u$ и $u(t) \in L_2$; $v_o(t)$ - вектор параметров неконтролируемых внешних возмущений размерности $dim(v_o) = n_v^o$ и $v_o(t) \in L_2$. Специальные свойства возмущений оговариваются принадлежностью к некоторому подпространству $\Omega_v \subset L_2$ и $v_o(t) \in \Omega_v$; $\Theta(t)$ - вектор параметров, в общем случае нестационарный и ограниченный $\Theta(t) \in \Omega_\Theta$ размерности $dim(\Theta) = N_\Theta$, а Ω_Θ - область возможных значений параметров; $f(\cdot), g(\cdot)$ - вектор-функции уравнений состояния и выхода, отвечающие условиям единственности решения, а в некоторых отдельных случаях оговариваются дополнительные ограничения, на-

пример условия Липшица и др.; $\xi(t)$ - случайный вектор измерительных помех, который статистически не связан с вектором возмущения.

Предположим, что допустимо представление модели вида (1) в виде номинальной линейной части и некоторого входного сигнала – эквивалентного возмущения функционального типа с ограниченной «мерой» энергии. Данное предположение основывается на идее достижимости номинальной модели, изложенной в работах [16,17]. Тогда систему (1) заменим номинальной возмущенной системой

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_v v(t), \\ y(t) &= C^i x(t) + D_u u(t) + D_v v(t) + \xi(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x(t)$ - вектор состояния размерности $dim(x) = n_x$; $y(t)$ - вектор выхода размерности $dim(y) = dim(y_o) = n_y^o$; $v(t)$ - вектор эквивалентных возмущений размерности $dim(v) = n_v^o$, который аккумулирует различные неопределенности внутреннего и внешнего характера; A, B_u, B_v, C, D_u, D_v - матрицы соответствующей размерности.

Степень приближения двух моделей (1) и (2) определяется возможностями оценивания вектора $v(t)$.

Восстановление возмущений итерационно-инверсным методом

Операторная форма итерационного способа восстановления возмущения и соответствующая реализация в пространстве состояния заключаются в следующем.

Представим выход объекта и номинальной модели в операторной форме

$$y(t) = W_i^{y/u} u(t) + W_i^{y/v} v(t) + W_i^{y/x} x_{i0} + \xi(t), \quad (3)$$

$$y_i(t) = W_i^{y/u} u(t) + W_i^{y/v} \hat{v}_0(t) + W_i^{y/x} x_{i0}, \quad (4)$$

где $W_i^{y/u}, W_i^{y/v}$ - линейные динамические операторы номинальной модели по возмущению и управлению, $\hat{v}_0(t)$ - известная начальная оценка вектора возмущения. Запишем для вполне наблюдаемого объекта по номинальной модели (4) выход наблюдателя состояния в операторной форме

$$\hat{y}_0(t) = W_e^{\hat{y}/u}(L)u(t) + W_e^{\hat{y}/y}(L)y(t) + W_e^{\hat{y}/v}(L)\hat{v}_0(t) + W_e^{\hat{y}/x}(L)\hat{x}_0, \quad (5)$$

где $W_e^{\hat{y}/u}(L)$, $W_e^{\hat{y}/y}(L)$, $W_e^{\hat{y}/v}(L)$, $W_e^{\hat{y}/x}(L)$ - операторы наблюдателя состояния, параметризация которых определяется настроечной матрицей L . Вычитая выход объекта (3) и выход наблюдателя состояния (5), запишем следующее уравнение относительно вектора возмущения:

$$\Delta\hat{y}_0(t) = W_e^{\hat{y}/v}(v(t) - \hat{v}_0(t)) + W_e^{\hat{y}/x}\Delta\hat{x}_0 + (I - W_e^{\hat{y}/y})\xi(t), \quad (6)$$

где $\Delta\hat{y}_0(t) = y(t) - \hat{y}_0(t)$, $\Delta\hat{x}_0 = x_0 - \hat{x}_0$. На первом шаге итераций принимаем $\hat{v}_0(t)$ известным и формируем оценку первого шага

$$\hat{v}_1(t) = \hat{v}_0(t) + K_v(y(t) - \hat{y}_0(t)), \quad (7)$$

где $K_v = (W_e^{\hat{y}/v}(0))^+$ - псевдообратная матрица по Муру-Пенроузу статического коэффициента усиления наблюдателя по возмущению (матричный коэффициент сходимости). На втором шаге, используя оценку $\hat{v}_1(t)$ в правой части выражения (7) вместо нулевой, формируем оценку

$$\hat{v}_2(t) = \hat{v}_1(t) + K_v(y(t) - \hat{y}_1(t)).$$

В последующем продолжение процесса осуществляем по итерационной схеме

$$\hat{v}_{j+1}(t) = \hat{v}_j(t) + K_v(y(t) - \hat{y}_j(t)), \quad (8)$$

для которой соответствующие уравнения в пространстве состояния имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_j(t) &= A\hat{x}_j(t) + L(y(t) - C\hat{x}_j(t) - D_u u_i(t) - \\ &\quad - D_v \hat{v}_j(t)) + B_u u_i(t) + B_v \hat{v}_j(t), \\ \dot{\hat{y}}_j(t) &= C\hat{x}_j(t) + D_u u_i(t) + D_v \hat{v}_j(t), \\ \dot{\hat{v}}_{j+1}(t) &= \hat{v}_j(t) + K_v(y(t) - \hat{y}_j(t)). \end{aligned} \quad (9)$$

Операторное выражение оценки возмущения

$$\hat{v}_{N_j+1}(t) = \left(I + \sum_{j=1}^{N_j+1} (I - K_v W_e^{\hat{y}/v})^j \right) K_v (W_e^{\hat{y}/v} v(t) + W_e^{\hat{y}/x} \Delta\hat{x}_0 + (I - W_e^{\hat{y}/y}) \xi(t) + (I - K_v W_e^{\hat{y}/v})^{N_j+1} \hat{v}_0)$$

и соответствующее условие сходимости итерационной схемы (9) имеет вид

$$\|I - K_v W_e^{\hat{y}/v}(L)\| = q < 1 \quad (10)$$

как условие сжимаемости операторного отображения.

Необходимым условием существования итерационно-инверсных моделей или существования оценки (9) является выполнение условия сильной наблюдаемости (обнаруживаемости) и $rank(W_e^{\hat{y}/v}(0)) = n_v$. Достаточным условием является выполнение условия сходимости (10).

Оценка ошибки восстановления возмущения имеет вид

$$\|v(t) - \hat{v}_{j+1}(t)\|_{L_2} \leq q^j e_0 + \frac{1 - q^j}{1 - q} (e_{x_0} + e_\xi), \quad (11)$$

где оценки ошибок: $e_0 = \|v(t) - \hat{v}_0(t)\|_{L_2}$ - задания начального значения возмущения; $e_{x_0} = \|K_v W_e^{\hat{y}/x} \Delta x_0\|_{L_2}$ - задания начальных условий наблюдателя состояния и возмущения; $e_\xi = \|K_v W_e^{\hat{y}/\xi} \xi(t)\|_{L_2}$ - измерительных помех, а $W_e^{\hat{y}/x}(s) = (sI - A + LC)^{-1}$ - резольвента наблюдателя состояния, $W_e^{\hat{y}/\xi}(s) = I - C(sI - A + LC)^{-1}L$ - матричная передаточная функция по наблюдению.

Оценка (11) позволяет установить следующее: 1) ошибка от задания начального значения оценки возмущения уменьшается с увеличением числа итераций при $q < 1$; 2) ошибка от несовпадения начальных условий наблюдателя состояния и возмущения и объекта убывает со скоростью затухания переходных процессов наблюдателя состояния и возмущения и не зависит от числа итераций; 3) ошибка оценки возмущения от измерительных помех зависит от параметрической настройки наблюдателя состояния и возмущения и числа итераций, которые необходимо, с одной стороны, уменьшать для снижения влияния помех, а с другой стороны, увеличивать - для приближения к инверсному оператору. Таким образом, для определения числа итераций необходимо компромиссное решение.

Синтез компенсаторов возмущений на основе итерационно-инверсных моделях

На основе линейного стационарного наблюдателя Люенбергера структура дискретного итерационно-инверсного фильтра для «правильной» системы принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_j(k+1) &= A\hat{x}_j(k) + B_u u(k) + L(y(k) - C\hat{x}_j(k) - \\ &\quad - D_u u(k) - D_v \hat{v}_j(k)) + B_v \hat{v}_j(k), \\ \hat{v}_{j+1}(k) &= D_v^+ (y(k) - C\hat{x}_j(k) - D_u u(k)), \\ \hat{x}_0(0) &= \hat{x}_0, \quad \hat{v}_0(k) = \hat{v}_{N_j}(k-1), \end{aligned} \tag{12}$$

а для «строго правильной» системы соответственно

$$\begin{aligned} \hat{x}_j(k+1) &= A\hat{x}_j(k) + B_u u(k) + L(y(k) - \hat{y}_j(k)) + B_v \hat{v}_j(k), \\ \hat{y}_j(k) &= C\hat{x}_j(k) + D_u u(k) + D_v \hat{v}_j(k), \quad \hat{x}_0(0) = \hat{x}_0, \\ \hat{v}_{j+1}(k) &= \hat{v}_j(k) + K_v (y(k) - \hat{y}_j(k)), \quad \hat{v}_0(k) = \hat{v}_{N_j}(k-1), \end{aligned} \tag{13}$$

для которых дискретные матричные передаточные функции итерационных фильтров имеют вид

$$W_1(z, L) = I - K_v (C(zI - A + LC)^{-1} (B_v - LD_v) + D_v),$$

$$W_1(z, L) = -(D_v)^+ C(zI - A + LC)^{-1} (B_v - LD_v).$$

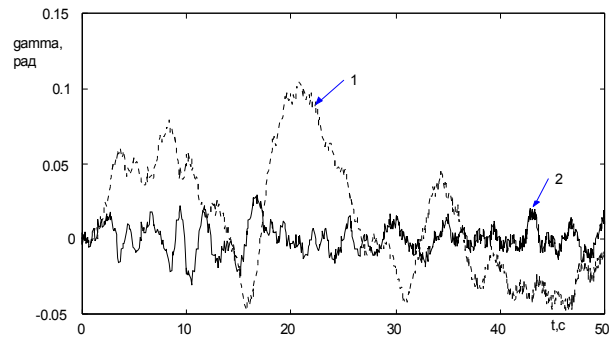
Условие параметризации наблюдателя состояния и возмущения вытекают из условий сходимости итерационного процесса $\|W_1(z, L)\| < 1$, а так же условий стабилизируемости или наблюдаемости [6].

Компенсатор возмущений представляет собой наблюдатель состояния и возмущения вида (12) или (13). Применение таких динамических компенсаторов возможно при управлении нелинейными динамическими системами с неопределенной динамикой. Если нелинейности модели объекта удовлетворяют условиям Липшица и выполняется ограниченность итерационных динамических операторов в некотором диапазоне нелинейной характеристики, то можно гарантировать сходимость оценок возмущения (12) или (13).

Применение динамических компенсаторов в системе угловой стабилизации самолета

В целях сокращения затрат на проектирование и эксплуатацию систем автоматического управления самолетов с сохранением динамических показателей

качества возникает необходимость применения дополнительных контуров на основе динамических компенсаторов эквивалентных возмущений в системах стабилизации углов тангажа и крена. На примере динамики самолета Ан-140 проведен параметрический синтез таких компенсаторов с требуемыми динамическими свойствами и степенью поглощения возмущений. Результаты математического моделирования стабилизации угла крена при полете самолета в турбулентной атмосфере для одноконтурной (со штатным законом ПД-управления) и двухконтурной схемах с динамическим компенсатором возмущений показаны на рисунке.



Стабилизированный угол крена для двух сравниваемых вариантов управления (1 – ПД - закон, 2 – закон управления с динамическим компенсатором)

Результаты моделирования свидетельствуют об эффективности разработанных динамических компенсаторов, которые увеличивают точность стабилизации (в 5-10 раз) не путем увеличения загрузки управляющих органов, а за счет фазовых сдвигов сигналов управления.

Заключение

Рассмотренные компенсаторы возмущений обладают важным свойством – разделимости в формировании управления для обеспечения динамических показателей замкнутой системы и компенсации возмущений и синтезе законов управления, что упрощает создание алгоритмического и программного обеспечения управляющих ЭВМ. Итерационная схема восстановления возмущения и синтезируемые на этой основе динамические компенсаторы обладают следующими важными свойствами:

- саморегуляризації и соответственно устойчивости измерительным помехам;

- возможностью строгого учета имеющейся разнотипной априорной информации о возмущениях на каждом шаге итераций;

- однородностью алгоритмических реализаций, заключающейся в повторении алгоритмов оценивания для новых значений оценок и соответственно упрощенном построении программного обеспечения.

Применимость таких компенсаторов для нелинейных систем обосновывается возможностью компенсации различий нелинейной и линейной моделей, что позволяет применять методы линейного синтеза анализа для построения систем управления.

Литература

1. Красовский А.А. Науковедение и состояние теории процессов управления // *АиТ*.-2000.-№ 4. - С. 3 -19.
2. Ивахненко А.Г. Кибернетические системы с комбинированным управлением. – К.: "Техніка". - 1966. -512 с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные системы.- М.: Наука, 1988.
4. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Комбинированные следящие системы. - К.: Техніка, 1978. - 264 с.
5. Кулебакин В.С. О поведении непрерывно возмущаемых автоматических систем линейных систем // *Докл. АН СССР*. - 1949. Т. 68. -№5. - С. 73 - 79.
6. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Системы управления с динамическими моделями. –Х.: Основа, 1996. – 212 с..
7. Потапенко Е.М. Синтез и сравнительный анализ компенсаторов пониженного порядка // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. - 1998. – №4. – С. 65-74.
8. Радченко И.Ф. Об одном способе оценки возмущений // *Автоматика*. – 1991. -№ 4. -С. 77-82.
9. Ротач В.Я. Об альтернативных положениях теории автоматического управления // *Проблемы управления и информатики*. - 1999. №2. -С.7-14.
10. Джонсон. Теория регуляторов, приспособляющихся к возмущениям // *Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах* / Под. ред. К.Т. Леондеса. - М.: Мир, 1980. – 253 с.
11. Tuan P.-C., Fong L.-W. An IMM tracking algorithm with input estimation// *Int. J. Syst. Sci.* 1996. - V. 27. No.7. – P. 629-639.
12. Garsia C.E., Morari M. Internal model control/ A unified review and some new results // *Ind. Eng. Chem. Process Des. and Dev.* – 1982. – V.21. №3. – P. 308-323.
13. КОРТУНОВ В.И. Дискретные фильтры восстановления возмущений с заданной степенью асимптотизма // *Системный анализ, управление и информационные технологии: Вест. Харьк. гос. политехн. ун-та: Сб. науч. тр.* - Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып.121. - С.118-123.
14. КОРТУНОВ В.И. Восстановление возмущений в динамической системе с заданной точностью // *Системы обробки інформації: Зб. наук. праць.* – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2000. - Вип.3(9). - С. 55-60.
15. КОРТУНОВ В.И. Оценивание возмущений в динамических системах на основе итерационно-инверсных моделей // *Системы обробки інформації: Зб. наук. праць.* – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001.- Вип.3(13). - С. 56-60.
16. КОРТУНОВ В.И. Критерии синтеза номинальных моделей // *Радіоелектроніка, інформатика, управління: Науковий журнал.* - Запоріжжя: ЗДТУ, 2001. - № 2. - С.159-163.
17. КОРТУНОВ В.И. Синтез номинальных моделей в задачах управления и наблюдения // *Радиоэлектроника и информатика.* – Х.: ХДТУРЭ, 2002. - № 1. - С. 45-49.

Поступила в редакцию 19.12.02

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Бодянский Е.В., Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков; канд. техн. наук, доцент Успенский В.Б., Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков.