

Подавление возмущений в системах управления с внутренними моделями: структурный подход

Л.М. Любчик¹

Abstract – The problem of unmeasurable disturbance rejection in multivariable system is considered based on Internal Model approach. The control structure including disturbance observer is investigated and conditions of disturbance decoupling compensator existence are suggested.

Keywords – Disturbance Rejection, Decoupling Compensator, Internal Model Control, Model Matching, Unknown-Input Observer.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблеме подавления возмущений, действующих на систему управления, посвящено огромное число работ, соответствующие методы могут быть разделены на методы ослабления возмущений и методы их частичной или полной компенсации. Методы первой группы, обеспечивающие снижение влияния возмущения до минимально достижимого уровня, основываются на использовании имеющейся априорной информации о классе возмущения, заданной в статистической либо нестатической форме. При этом решение задачи синтеза ищется в классе классических структур систем регулирования по отклонению и формализуется в виде оптимизационной задачи. Существенного повышения точности управления можно достичь путем использования дополнительной текущей информации о реализациях возмущений, полученной путем их непосредственного или косвенного измерения. Соответствующие методы синтеза основаны на использовании многоканальных структур управляющих устройств, включающих в себя модели объектов управления и возмущающих воздействий. Указанный подход, известный под названием "метода внутренних моделей" (ИМС - Internal Model Control), получают все более широкое распространение в современной теории и практике управления [1,2]. При этом соответствующие модели используются как для косвенного измерения возмущений, так и для их прогнозирования и компенсации с целью обеспечения так называемой селективной инвариантности [3].

В настоящей работе анализируются различные структуры, реализующие оценивание и компенсацию неизмеряемых возмущений и предлагается методика синтеза развязывающего динамического компенсатора, обеспечивающего подавление возмущения при слежении за задающим воздействием.

II. СИСТЕМЫ С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассматривается задача управления линейным многомерным объектом при наличии недоступных непосредственному измерению возмущений:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Nw, \quad y_c = Cx, \quad y_m = Mx, \quad (1)$$

Предполагается, что выполнены условия:

$$\text{rank } B = m, \text{rank } C = r, \text{rank } N = q, \text{rank } M = p,$$

$$\text{rank } B = \text{rank } S_{CB} = CB = r, \text{rank } N \leq \text{rank } S_{MN} = MN = p. \quad (2)$$

Задача управления состоит в формировании такого закона управления $u(g, y_m)$ в функции измеряемых переменных y_m , чтобы регулируемая переменная y_c удовлетворяла уравнению эталонной модели $\dot{g} = A^*g + y_{ref}$ с одновременной компенсацией влияния возмущающего воздействия w на ошибку регулирования $e = g - y_c$.

Задача компенсации непосредственно измеряемых возмущений достаточно хорошо изучена и реализуется с помощью структур двухканальных регуляторов.

При наличии недоступных непосредственному измерению возмущений в структуру системы управления вводится измеритель (наблюдатель) возмущения, реализуемый на основе внутренней модели объекта, двухходовой согласованной динамической модели, либо наблюдателя состояния, инвариантного к неизмеряемым возмущениям (unknown-input observer [4]).

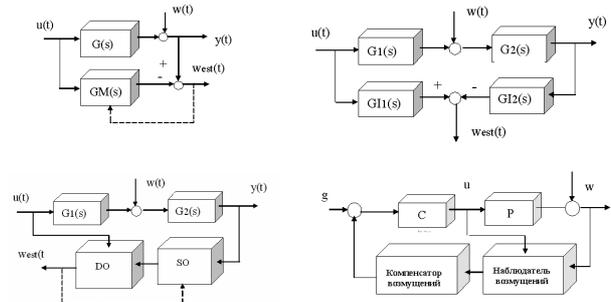


Рис.1. Структуры наблюдателей возмущений

Показано, что для многомерных объектов различные структуры косвенных измерителей возмущений (рис. 1) могут быть преобразованы к единой схеме динамического наблюдателя возмущений, что позволяет обосновать единообразную процедуру их синтеза.

Уравнение динамического наблюдателя возмущений пониженного порядка получено в виде [5]:

¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, УКРАИНА, E-mail: lyubchik.leonid@gmail.com

$$\dot{\bar{x}} = R\Pi_N A Q \bar{x} + R\Pi_N A P y_m + R N S_{NM}^+ \dot{y}_m + R \Pi_N B u,$$

$$\hat{w} = \bar{C}_N (\dot{y}_m - M A Q \bar{x} - M A P y_m - S_{MB} u), \bar{C}_N = S_{MN}^+ + N Q \Omega_N, \quad (3)$$

где $\Pi_N = I_n - B S_{MN}^+ M$, $\Omega_N = I_p - S_{MN} S_{MN}^+$, R - матрица агрегирования переменных состояния, удовлетворяющая условиям: $\text{rank}(M^T R^T) = n$, $P M + Q R = I_n$, $M P = I_p$,

$$R Q = I_{n-p}, \quad M Q = 0_{p, n-p}, \quad R P = 0_{n-p, p}.$$

III СИНТЕЗ РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО КОМПЕНСАТОРА

Полученные оценки возмущения \hat{w} могут быть использованы для его подавления путем подачи на вход статического компенсирующего регулятора

$$u^* = S_{CB}^{-1} (g + C_A \hat{x} - S_{CN} \hat{w}), \quad C_A = A^* C - C A. \quad (4)$$

Представляет интерес получение условий, при которых уравнения компенсирующего регулятора (4) и наблюдателя возмущений (3) могут быть разрешены относительно функции управления путем исключения оценки возмущения. Соответствующие условия, названные условиями структурной невырожденности системы, гарантирующие существование развязывающего компенсатора, получены в следующем виде:

$$\text{rank } \bar{S} = m + q, \quad \bar{S} = \begin{pmatrix} I_m & S_{CB}^{-1} S_{CN} \\ S_{MN}^+ S_{MB} & I_q \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При невыполнении структурных условий (5) для подавления возмущения предложено использовать реализуемую модификацию развязывающего компенсатора, включающего в себя вспомогательный динамический фильтр с малыми параметрами $0 < \varepsilon, \mu \ll 1$:

$$u^* = S_{CB}^{-1} (y_{ref} + C_A \hat{x} - S_{CN} \tilde{w}), \\ \varepsilon \dot{\tilde{w}} = -\tilde{w} + (1 - \mu) \hat{w}, \quad \hat{x} = P y_m + Q \tilde{w}. \quad (6)$$

Тогда уравнения реализуемого развязывающего компенсатора с «быстрым» динамическим фильтром могут быть представлены в следующем виде:

$$\varepsilon \dot{\tilde{u}} = -\mu \tilde{u} + (1 - \mu) (v_1 + S_{CB}^{-1} S_{CN} v_2), \quad u^* = \tilde{u} + v_1, \quad (7)$$

$$v_1 = S_{CB}^{-1} (y_{ref} + C_A \hat{x}), \quad v_2 = C_N (\dot{y}_m - M A Q \bar{x} - M A P y_m).$$

Используя метод разделения движений [6], можно получить уравнения медленных движений в замкнутой системе с развязывающим компенсатором (6):

$$\dot{\bar{x}} = A^0 \bar{x} + \Pi_B N w + B S_{CB}^{-1} y_{ref}, \quad (8) \\ A^0 = A + B S_{CB}^{-1} C_A = \Pi_B A + B S_{CB}^{-1} A^* C.$$

Поскольку $C A^0 = A^* C$, то для системы медленных движений (8) достигается цель управления. Для этого необходимо выполнение условий устойчивости системы быстрых движений, описываемых уравнениями:

$$E(\varepsilon) \dot{\bar{x}} = \tilde{A}^0 \bar{x} + \tilde{B}^0 w, \quad (9) \\ E(\varepsilon) = \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ 0 & \varepsilon I_q \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}^0 = \begin{pmatrix} A^0 & -B S_{CB}^{-1} S_{CN} \\ 0_{q, n} & -I_q \end{pmatrix}, \quad \tilde{B}^0 = \begin{pmatrix} N \\ (1 - \mu) I_q \end{pmatrix}.$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование хорошо зарекомендовавших себя на практике структур регуляторов, более сложных, нежели классические схемы обратной связи, несомненно является перспективным с точки зрения решения задачи подавления возмущений. При этом разрешимость соответствующих задач синтеза и достижимая степень подавления возмущения определяется структурными свойствами системы (табл. 1,2).

ТАБЛИЦА 1

РАЗРЕШИМОСТЬ ЗАДАЧ СИНТЕЗА

Структурные свойства системы	Разрешимость задач синтеза
Обратимость	Структурный синтез наблюдателя возмущений
Сильная наблюдаемость	Параметрический синтез наблюдателя возмущений
Структурная невырожденность	Структурный синтез развязывающего компенсатора

ТАБЛИЦА 2

СТЕПЕНЬ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

Свойства системы	Достижимая степень подавления возмущений
Структурно-невырожденная Минимально-фазовая	Теоретическая абсолютная инвариантность
Структурно-невырожденная Неминимально-фазовая	Инвариантность до ε
Структурно-вырожденная Минимально-фазовая	Теоретическая абсолютная инвариантность медленных движений
Структурно-вырожденная Неминимально-фазовая	Инвариантность до ε медленных движений

Дальнейшее развитие структурных методов синтеза регуляторов, подавляющих возмущения, в первую очередь должно быть направлено на обеспечение их робастности в условиях неопределенности модели объекта.

СПИСОК ССЫЛОК

- [1] Morari M., Zafirov E. Robust process control. New Jersey: Prentice Hall, - 1989. - 488 p.
- [2] Tsytkin Ya. Z., Holmberg U. Robust stochastic control and internal model control // Int. J. of Control. 1995. - Vol. 61. - No 4. - P. 809-822.
- [3] Цыпкин Я.З. Адаптивно инвариантные дискретные системы управления // Автоматика и телемеханика. - 1991. - № 5. - С. 96-124.
- [4] Hou M., Muller P.C., Design of observers for linear systems with unknown inputs, IEEE Trans. on Automatic Control, 1992, v.37, pp.871-875.
- [5] Lyubchik L.M., Mueller P.C. Robust disturbance decoupling in multivariable systems via the unknown-input observers // Proceedings of IFAC World Congress, Prague, 2005.
- [6] Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. - М.: Наука, - 1985. - 352 С.