

ВЫСОКОТОЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ

Введение. Все системы управления (СУ) в той или иной степени являются неопределенными. Неопределенности могут быть: 1) экзогенными, определяемыми внешними воздействиями, 2) координатными (не полностью и не точно известен вектор состояния), 3) параметрическими, 4) структурными, связанными с наличием паразитной динамики. Неопределенности ухудшают точность СУ и могут привести к потере их работоспособности. Работоспособность систем управления в условиях малой неопределенности исследуется с помощью теории чувствительности [1]. На практике часто неопределенности могут быть не малые, а большие. Для обеспечения работоспособности систем управления в условиях большой неопределенности разработаны робастные системы управления (от английского слова **robust** – грубый, крепкий, нечувствительный). Как видно из сказанного, системы управления, обладающие свойством робастности, повышают точность, надежность работы всего технологического оборудования, увеличивают степень автоматизации производства, повышают производительность технологического оборудования, что в совокупности дает большой экономический эффект.

Материалы исследования. Свойством грубости в той или иной степени обладают все системы управления. Некоторой грубостью (но не робастностью) к неопределенностям обладают получившие в промышленности широкое распространение **ПИ- и ПИД-регуляторы**. Среди методов, специально разработанных для обеспечения работоспособности в условиях большой неопределенности, следует отметить

- интервальные методы управления (ИМУ),
- методы с большими коэффициентами усиления (МБКУ),
- релейные методы управления с переменной структурой (РМПС),
- сглаженные методы с переменной структурой (СМПС),
- комбинированные методы управления с наблюдателями неопределенности (КМУН),
- адаптивные методы управления с идентификацией параметров (АМУИП),
- адаптивные методы управления с моделью (АМУМ),
- методы управления с использованием обратной динамики (МУОД).

ИМУ [3-5], куда из-за их близких возможностей включены системы управления, оптимизированные по В.Л. Харитонову [3, 4] или с помощью метода H^∞ [5]. Указанные методы оптимизации применимы только для линейных непрерывных систем с измерением всего вектора состояния и гарантируют только асимптотическую устойчивость, не гарантируя точность и другие показатели качества системы.

МБКУ [6], допускающие большой коэффициент усиления разомкнутой системы, обладают повышенной точностью и робастной устойчивостью по отношению к неопределенности параметров и внешним низкочастотным воздействиям, причем точность возрастает с увеличением коэффициента передачи разомкнутой цепи. Однако при больших коэффициентах передачи возможно появление неустойчивости высокочастотной не учитываемой динамики, а также появление ошибок из-за высокочастотных помех. Кроме того, не все системы управления допускают неограниченное увеличение коэффициента передачи.

Для повышения робастности и уменьшения управляющих воздействий были предложены РМПС [7], работающие в релейном режиме без зоны нечувствительности. Эта особенность, помимо увеличения робастности и точности, обуславливает появление скользких режимов работы (режим противовключения исполнительных органов). Скользящие режимы могут приводить к неустойчивости неучтенной динамики, увеличивают потребление энергии на управление и износ механизмов, уменьшают помехоустойчивость системы.

Для уменьшения недостатков РМПС в них релейные звенья с ограничениями меняют на линейные звенья с насыщением, в результате чего получаются ССПС [8]. Эти системы по динамическим характеристикам близки к МБКУ, но развивают ограниченные управляющие воздействия, что ухудшает точность и робастность.

В теории управления можно выделить две основные задачи. Прямой задачей является определение процессов в системе заданной структуры. Обратной задачей является определение структуры и параметров регулятора (закона управления) по заданным процессам на выходе системы управления. Пусть дано матричное уравнение движения объекта управления

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gf, \quad x = x(t), \quad (1)$$

где x, u, f – векторы состояния, управления и внешних воздействий соответственно; A, B, G – матрицы объекта, управления и внешних воздействий. **Прямая задача** будет выглядеть так: зная A, B, G, u, f , найти x . **Обратная задача:** зная A, B, G, f, x , найти u . Метод решения обратной задачи можно использовать для синтеза закона управления, обеспечивающего движение по заданной траектории. Так как матрицы A, B, G, f обычно точно неизвестны, то закон управления надо построить так, чтобы было скомпенсировано влияние неточностей. Вследствие указанных неточностей, а также по причине возможного незнания начальных условий $x(0)$, за счет закона

управления надо обеспечить, по крайней мере, асимптотическую устойчивость заданной траектории. Этот метод управления выше был назван МУОД [9, 10]. Робастность МУОД обычно обеспечивается за счет применения описанных выше методов управления МБКУ, РМПС, СМПС. Следовательно, МУОД обладает теми же достоинствами и недостатками, что и перечисленные методы управления.

Основным методом обеспечения инвариантности системы по отношению к внешним воздействиям является комбинированное управление. Покажем, как с помощью комбинированного управления можно обеспечить робастность системы по отношению к ее неопределенности и нелинейности. Другими словами, как преобразовать нелинейную нестационарную неопределенную систему в линейную стационарную детерминированную систему. Пусть задан объект управления в виде (1) с измерением

$$y = Cx + Dv, \quad (2)$$

где y, v – векторы измерения и погрешностей датчиков соответственно. Пусть также A, B, C – неопределенные матрицы объекта, управления и измерения, зависящие от вектора состояния и времени. Будем полагать, что

$$A = A_0 + A_\delta, \quad B = B_0 + B_\delta, \quad C = C_0 + C_\delta, \quad (3)$$

где A_0, B_0, C_0 – известные постоянные номинальные матрицы, $A_\delta, B_\delta, C_\delta$ – неизвестные отклонения от номинальных значений. Подстановка (3) в (1) и (2) дает

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u + G_\Sigma f_\Sigma, \quad y = C_0 x + D_\Sigma v_\Sigma, \quad (4), (5)$$

$$G_\Sigma f_\Sigma = A_\delta x + B_\delta u + G f, \quad D_\Sigma v_\Sigma = C_\delta x + D v - \quad (6)$$

векторы неопределенностей. Система уравнений (4), (5) описывает линейный стационарный детерминированный объект, к которому приложены внешние воздействия в виде неопределенностей (6). При наличии оценки неопределенностей с помощью наблюдателя (см. ниже) для объекта (4), (5) можно построить линейное стационарное комбинированное управление с заранее заданными показателями качества, характерными для линейных систем. Такие системы управления получили название **комбинированные методы управления с наблюдателями неопределенности (КМУН)** [11-14]. Таким образом, данный метод позволяет для нелинейного нестационарного неопределенного объекта синтезировать линейный стационарный регулятор, обеспечивающий заданные показатели качества системы управления. Особо следует отметить то, что в КМУН задачи компенсации воздействий и обеспечения заданных показателей качества переходных процессов решаются независимо, что упрощает синтез СУ. Поскольку в регуляторе не используются ни большие коэффициенты передачи, ни релейные звенья, то КМУН обеспечивают точное управление с уменьшенной вероятностью возбуждения неучтенной динамики. Совокупность наблюдателя векторов неопределенности и состояния и регулятора, обеспечивающего компенсацию неопределенности и управление заданным перемещением, называется **компенсатором**.

АМУИП с идентификацией параметров в реальном времени [15], в основном, предназначены для линейных систем. Их возможности сильно ограничиваются с увеличением количества идентифицируемых параметров из-за необходимости выполнения условий их идентифицируемости, которые определяются характером движения. Это ведет к ужесточению требований, предъявляемых к характеру движения системы, которое может не соответствовать технологическому процессу.

В АМУМ [16-18] задается модель желаемого движения в виде уравнений с начальными условиями, возможно более близкими к начальным условиям объекта управления. Задачей является воспроизведение объектом управления движения модели. Поскольку система управления должна отслеживать заданную траекторию, то уравнения движения представляются в виде двух составляющих: уравнений эталонной модели и уравнений движения относительно этой модели. Для сложных объектов управления последние будут нелинейными нестационарными уравнениями с переменными неизвестными параметрами. Это обстоятельство затрудняет как синтез алгоритмов управления, так и исследование устойчивости эталонной траектории. Законы управления получаются нестационарными.

Приведенный обзор робастных методов управления позволяет сделать заключение, что наибольшей робастностью и точностью обладают МБКУ, РМПС, СМПС, КМУН. Помимо робастности, эти методы превосходят другие методы по точности управления. В отличие от первых трех методов КМУН, имея ту же точность, не требует больших коэффициентов передачи регуляторов, его применение не сопровождается скользящими режимами, не предъявляет к структуре объекта управления ограничительных требований по сохранению устойчивости при бесконечном увеличении коэффициента передачи. С помощью наблюдателя, входящего в КМУН, можно исключить влияние погрешностей датчиков. Поскольку КМУН компенсируют влияние всех неопределенностей, включая внешние воздействия и погрешности датчиков, то данный метод обладает наибольшими возможностями обеспечения высокой точности.

Для высокоточных робастных систем управления необходимо точное знание всего вектора состояния. Однако на практике измерить весь вектор состояния не представляется возможным. В этом случае используют наблюдатели. Бытует мнение, что наблюдатели вектора состояния неопределенных объектов неработоспособны [4, с. 216]. Однако это не так. Во-первых, существуют асимптотические дифференциаторы [19, 20], позволяющие получать скорости и ускорения по позиционным, даже зашумленным, сигналам без привлечения модели объекта. Во-вторых, было обнаружено, что наблюдатели с очень большим быстродействием [21] или с блоком переменной структуры [22] обладают свойством робастности по отношению к разбросу параметров объекта и управляющей системы. Эти наблюдатели требуют точных датчиков. В случае МБКУ, РМПС, СМПС получен-

ная в указанных наблюдателях (с большими коэффициентами усиления) информация используется в регуляторах с большими коэффициентами усиления или с переменной структурой, что делает всю систему управления вдвойне чувствительной к высокочастотным шумам датчиков и приводит к возникновению нежелательного “дребезга” (высокочастотного противовключения исполнительных органов). Для применения комбинированного управления было предложено [23] для системы (4), (5), дополненной параболическими моделями неопределенностей, например, в простейшем случае

$$\frac{d}{dt}(G_{\Sigma} f_{\Sigma}) = 0, \quad \frac{d}{dt}(D_{\Sigma} v_{\Sigma}) = 0 \quad (7)$$

(предполагается, что на интервале времени, характерном для наблюдателя, можно полагать $G_{\Sigma} f_{\Sigma} = \text{const}$, $D_{\Sigma} v_{\Sigma} = \text{const}$), использовать расширенный наблюдатель с большим быстродействием, в котором, наряду с вектором состояния, оцениваются векторы неопределенностей как воздействия на объект, так и погрешностей датчиков (10). Полученная в наблюдателе информация используется в комбинированном регуляторе с компенсацией влияния неопределенностей и с уменьшенными значениями коэффициентов усиления по сравнению с коэффициентами МПС и МБКУ [11-14]. Для повышения быстродействия регуляторов КМУН без увеличения их коэффициентов усиления можно использовать управление с участием ускорений, полученных с помощью выше указанных наблюдателей. Причем это управление отличается от управления по ускорению работы [24].

Выводы. Проведенное сравнение методов управления неопределенными объектами позволяет заключить, что наибольшими возможностями обеспечения высокой точности и робастности по отношению к перечисленным в начале статьи факторам обладает комбинированный метод управления с наблюдателями вектора неопределенности [11-14].

Литература.

1. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
2. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
3. Харитонов В.Л. Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. – 1978. – N 11. – С. 2086-2088.
4. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. – Киев: Наукова думка, 2006. – 264 с.
5. Позняк А.С. Основы робастного управления (H^{∞} -теория). – М.: МИФИ, 1991.
6. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. – М.: Наука, 1967.
7. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1981. – 368 с.
8. Mostafa O., Oz H. Chatter elimination in variable structure control maneuvering of flexible spacecraft // The Journal of the Astronautical Sciences. 1989. – Vol. 37, N 4. – Pp. 529-550.
9. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. – М.: Наука, 1987.
10. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, 1988.
11. Потапенко Е.М. Сравнительная оценка робастных систем управления с различными типами наблюдателей // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1995. - N 1. – С. 109-117.
12. Потапенко Е.М. Робастные комбинированные системы управления с наблюдателями // Проблемы управления и информатики (Киев, НАНУ). – 1995. - № 2. – С. 36-44.
13. Потапенко Е.М. Исследование робастности систем управления с наблюдателями // Изв. РАН. Теория и системы управления. (Москва) – 1996. - N2. – С. 104-108.
14. Потапенко Е.М. Синтез и сравнительный анализ робастных компенсаторов пониженного порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. (Москва) – 1998. - N 4. – С. 65-74.
15. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – Москва: Наука, 1991. – 432 с.
16. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука, 1990.
17. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
18. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб.: Наука, 2003.
19. Дылевский А.В., Лозгачев Г.И. Применение метода пространства состояний для синтеза дифференциаторов // Автоматика и телемеханика. – 1999. – N 9. – С. 123-20.
20. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., Казурова А. Е. Асимптотическое дифференцирование ступенчатых сигналов в задачах управления скоростью и перемещением // Электромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Вип. 66. – Київ, «Техніка», 2006. – С. 286-287.
21. Saberi A. Sannuti P. Observer based control of uncertain systems with non-linear uncertainties // International Journal of Control. – 1990. – V. 52, N 5. – P. 1107-1130..
22. Zak S.H., Brehove J.D., Corless M.J. Control of uncertain systems with unmodeled actuator and sensor dynamics and incomplete state information // IEEE Trans. on Syst., Man and Cybernetics. – 1989. – V. 19, N 2. – P. 241-257.
23. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценка и стабилизация. – М.: «Наука». Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977.
24. Крутько П.Д. Декомпозирующие алгоритмы робастно устойчивых нелинейных многосвязных управляемых систем. // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2005. – N 1. – С. 5-31.