

возможность выявления и количественного описания взаимосвязи между входными и выходными переменными системы. Последнее эквивалентно невозможности получения модели системы в том и только в том случае, если этот теоретико-информационный критерий обращается в нуль, что явно указывает на взаимную стохастическую независимость входных и выходных переменных исследуемой системы.

Список литературы

1. Сарманов О.В., Захаров В.К. Меры зависимости между случайными величинами и спектры стохастических ядер и матриц // Математический сборник. 1960. Т. 52(94). № 4. С. 953–990.
2. Tsallis C. Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics. Approaching a Complex World. New York: Springer Science+Business Media, 2009. 388 p.
3. Morkadem A. Estimation of the entropy and information of absolutely continuous random variables // IEEE Transactions on Information Theory. 1989. Vol. IT-35. Pp. 193–196.

УДК 681.5

doi:10.18720/SPBPU/2/id20-154

*Ильсов Барый Галеевич*¹,
д-р техн. наук, профессор, профессор;
*Саитова Гузель Асхатовна*²,
канд. техн. наук, доцент, доцент;
*Елизарова Анастасия Валерьевна*³,
аспирант

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АДАПТИВНОЙ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

^{1,2,3} Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия,

¹ ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, ² saitova@bk.ru, ³ elizarovaanastasia@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается класс адаптивных многосвязных систем, в которой могут происходить как плавные, так и внезапные структурные изменения в каждой из подсистем. Задача управления заключается в формировании таких управляющих связей между подсистемами, которые восстанавливают требуемые свойства системы в целом. Предлагается оценка устойчивости адаптивной многосвязной системы управления сложным динамическим объектом при изменении структуры системы.

Ключевые слова: многосвязные системы, устойчивость, частотные методы, структурные изменения, адаптивные системы.

Barii G. Ilyasov¹,
Doctor of Engineering Sciences, Professor;
Guzel A. Saitova²,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;
Anastasia V. Elizarova³,
Post-graduate Student

THE STABILITY ANALYSIS OF ADAPTIVE MULTIVARIABLE SYSTEM BY COMPLEX DYNAMIC OBJECT WITH STRUCTURAL CHANGES

^{1,2,3} Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia,

¹ ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, ² saitova@bk.ru, ³ elizarovaanastasia@gmail.com

Abstract. The paper considers a class of adaptive multi-connected systems, in which both smooth and sudden structural changes can occur in each of the subsystems. The task of management is to form such control relationships between subsystems that restore the required properties of the system as a whole. It is proposed to evaluate the stability of an adaptive multi-connected system by a complex dynamic object when the system structure changes.

Keywords: multi-link systems, stability, frequency methods, structural changes, adaptive systems.

Введение

Современные системы автоматического управления (САУ) сложными динамическими объектами (СДО) требуют разработки их в классе адаптивных многосвязных систем автоматического управления (МСАУ). Особенностью данного класса систем является то, что МСАУ представляет собой множество самостоятельно управляемых подсистем (агентов), взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом для достижения общей цели. При этом изменение в поведении одной из подсистем вызывает отклик у всех остальных, характер которого зависит от характера отношений между подсистемами, которые в свою очередь могут изменяться в процессе функционирования МСАУ. Примерами современных МСАУ сложными динамическими объектами являются энергетические комплексы, технологические процессы, синхронные генераторы, а также газотурбинные двигатели летательных аппаратов.

При построении адаптивной системы управления необходимо учитывать «структурные» неопределенности, вызванные тем, что объект управления может быть не только многосвязным, но также многофункциональным (многорежимным) объектом управления, что требует координации процесса функционирования как отдельных подсистем, так и всей системы в целом. При этом для быстрой и качественной адаптации

системы в целом к изменившимся условиям функционирования необходима совместная одновременная координация и адаптация отдельных подсистем к этим условиям (например, координация функционирования подсистем в нестандартных условиях при нарушениях либо связи между подсистемами, либо структурных свойств отдельных подсистем); необходимо адаптивное управление системой при нарушении ее структурных свойств (например, потеря устойчивости отдельными подсистемами при выходе исполнительного механизма на ограничения по перемещению или по скорости) [1 – 4].

Основная трудность при проектировании МСАУ СДО заключается в обеспечении на всех режимах эксплуатации системы ее устойчивости и желаемого качества функционирования как многосвязной системы в целом, так и её сепаратных подсистем, поскольку при изменении компоновки системы или изменении динамических свойств ее сепаратных подсистем меняется и описывающая ее система дифференциальных уравнений [2]. Потому с целью придания МСАУ СДО свойств адаптации и самоорганизации требуется разработка обоснованных рекомендаций по выбору параметров и структуры как управляющей, так и исполнительной части системы.

1. Постановка задачи

Адаптивное управление сложными динамическими объектами основано на способе системного описания МСАУ на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними, а также на применении частотных методов анализа и синтеза многосвязных систем автоматического управления [1].

В работе используется наиболее рациональная классическая двухуровневая адаптивная структура МСАУ (рис. 1) [4], где ЗУ – задающее устройство, ИМ – исполнительный механизм, ЭМ МСАУ – эталонная модель МСАУ, ПР – перестраиваемый регулятор, $X_0(t)$ – управляющее воздействие, $\delta(t)$ – ошибка адаптации.

Регулирование адаптивной МСАУ происходит за счет изменения динамических характеристик перестраиваемого регулятора либо путем варьирования его коэффициентов и структуры, либо путем введения в него дополнительных перекрестных связей между сепаратными подсистемами.

Таким образом, применение предложенной структуры для класса адаптивных МСАУ СДО позволит повысить робастность системы, запасы ее устойчивости при изменении свойств МСАУ в широком диапазоне.

Предлагается оценка устойчивости адаптивной многосвязной системы сложным динамическим объектом при изменении структуры системы.

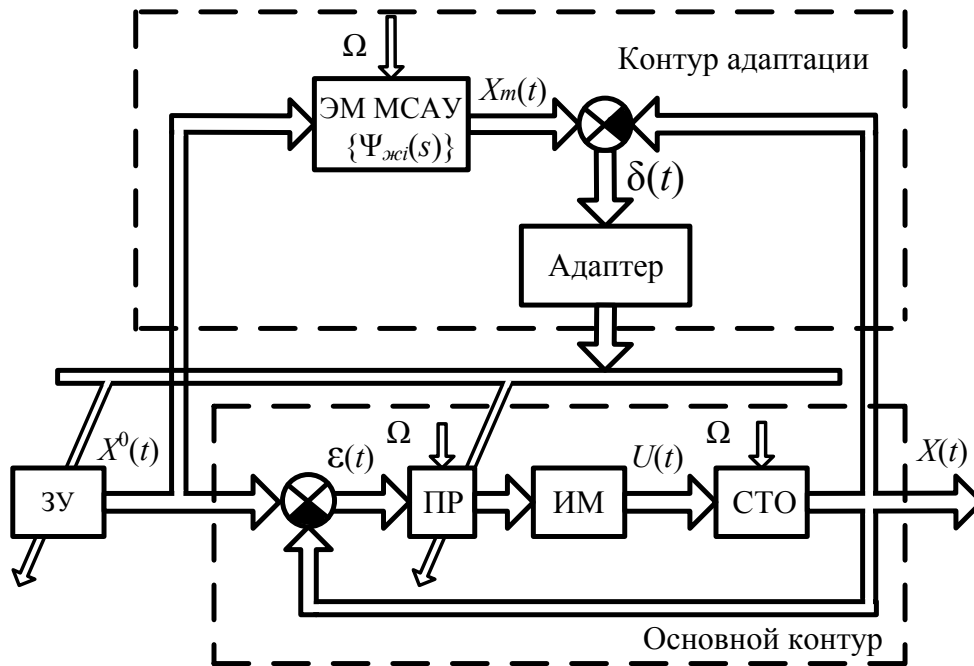


Рис. 1. Обобщенная структурная схема адаптивной МСАУ

2. Задачи синтеза адаптивных многосвязных систем автоматического управления из условия устойчивости и качества

Синтез структур адаптивной МСАУ сложными динамическими объектами, основан на способе системного описания МСАУ на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними.

Задача синтеза МСАУ делится на две задачи. Первая задача заключается в том, что производится приведение динамических характеристик сепаратных подсистем к их собственным желаемым эталонным моделям из условия обеспечения требований устойчивости и качества управления по каждой из регулируемых координат. Вторая задача заключается в том, что МСАУ в целом синтезируется по желаемой эталонной модели многомерной связи между ее сепаратными подсистемами, которая получена частотным методом из условия обеспечения устойчивости и требуемого качества управления МСАУ на данном режиме.

Таким образом, применение предложенного подхода к синтезу МСАУ по модели ее многомерной связи, совместно с приведением ее сепаратных подсистем к желаемой модели их АФХ является необходимым и достаточным условием для обеспечения устойчивости и качества управления многосвязной системой. К тому же предложенный подход позволяет в полной мере учесть структурные особенности проектируемой МСАУ.

Таким образом, синтез адаптивной МСАУ состоит из нескольких этапов:

1) Сепаратные подсистемы синтезируются из условия, что их характеристики стремятся к собственным желаемым эталонным моделям $\Phi_i(j\omega) = \Psi_{ж}(j\omega)$.

Желаемые передаточные функции подсистем $\Psi_{жи}(s)$ определяются любым известным методом с учетом технических требований для сепаратных подсистем МСАУ.

2) Многомерные связи синтезируются из условия, что их характеристики стремятся к желаемой эталонной модели многомерной связи $h_i \rightarrow h_{0i}$, отсюда корни $x_i \rightarrow x_{0i}$.

Здесь коэффициенты связи нескорректированной h_i системы, а h_{0i} коэффициенты желаемой эталонной модели уравнения связи (1)

$$D(x, h) = 1 + h_{02}x^2 + h_{03}x^3 + \dots + h_{0n}x^n = 0. \quad (1)$$

Уравнение связи нескорректированной системы имеет следующий вид (2)

$$D(x) = 1 + h_2x^2 + h_3x^3 + \dots + h_nx^n = 0 \quad (2)$$

Точность приближения системных коэффициентов должна быть такова, что величина отклонения корней уравнения связи от желаемых значений не должна превышать 5 %, так как при таком отклонении качество переходных процессов меняется незначительно.

3. Анализ устойчивости МСАУ при структурных изменениях

Формализуем алгоритм исследования устойчивости МСАУ с изменяемой структурой. На первом этапе запишем индивидуальную характеристику i -й подсистемы МСАУ. В данном случае рассматривается передаточная функция $\Phi_i(s)$ в режиме управления, полученная в результате декомпозиции МСАУ на подсистемы и характеристики связей:

$$\Phi_i(s) = \frac{X_i(s)}{X_i^o(s)} = \frac{\sum_{j=1, i=1}^n R_{ji}(s)W_{ij}(s)}{1 + \sum_{j=1, i=1}^n R_{ji}(s)W_{ij}(s)}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Адаптивное управление в таких системах часто проводится за счет параметрических или структурных преобразований регуляторов сепаратных подсистем $R_i(s)$.

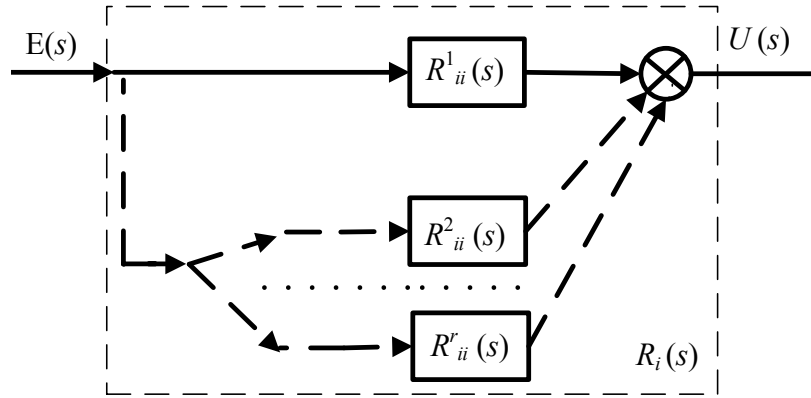


Рис. 2. Структурная схема перестраиваемого регулятора сепаратной подсистемы

Структура изменяемой части системы: регулятора сепаратных подсистем определяется из множества элементов $R_{ii}(s) = \{R_{ii}^1(s), \dots, R_{ii}^r(s)\}$, удовлетворяющих условию полной управляемости.

На втором этапе определяется устойчивость МСАУ при структурных изменениях регулятора или в результате разрыва связей. Воспользуемся частотными критериями, предложенными в [5].

Для этого предполагаем, что передаточные функции $\Phi_i(s)$ сепаратных подсистем представляют собой

$$\Phi_i(s) = \Phi(s) \cdot \Delta_i, \text{ где } i = \overline{1, n}.$$

Здесь $\Phi(s)$ – базовая передаточная функция, характеризующая основные требования к качеству переходного процесса, Δ_i – дополнительные дробно-рациональные функции комплексного переменного, отражающие индивидуальные требования к динамическим свойствам отдельных сепаратных подсистем. Для дальнейшего анализа МСАУ отнесем дополнительные функции Δ_i к характеристикам связи между подсистемами $h_k^*(s)$, $k = \overline{2, n}$.

Тогда характеристическое уравнение имеет вид

$$D(h^*, \Phi) = 1 + h_2^* \Phi^2 + \dots + h_n^* \Phi^n = 0, \text{ где}$$

$$h_2^*(s) = \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^{C_n^2} h_{ij} \Delta_i \Delta_j, \quad h_3^*(s) = \sum_{\substack{i,j,k \\ i < j < k}}^{C_n^3} h_{ijk} \Delta_i \Delta_j \Delta_k, \dots, \quad h_n^*(s) = h_{12\dots n} \prod_{i=1}^n \Delta_i, \quad i = j = \overline{2, n}.$$

Критерий устойчивости: если амплитудно-фазовая характеристика $\Phi(j\omega)$ подсистем при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ не охватывает корневые годографы $\lambda_i(j\omega)$ уравнения связи (2), то МСАУ устойчива. Если годограф $\Phi(j\omega)$ пересекается хотя бы с одним корневым годографом $\lambda_i(j\omega)$, $i = \overline{1, n}$, то в этом случае устойчивость многосвязной системы определяет-

ся взаимным соотношением частот ω_{Φ}^k и ω_{λ}^k в точках пересечения годографа $\Phi(j\omega)$ и корневого годографов $\lambda_i(j\omega)$. Для устойчивости МСАУ достаточно, чтобы функции $\delta_i^k = (\omega_{\Phi}^k - \omega_{\lambda}^k)$, где k – количество точек пересечения годографов, были знакоопределёнными (рис. 3) [5].

С помощью частотных методов можно наглядно увидеть, как влияет на устойчивость МСАУ разрыв той или иной связи или изменение ее структуры. При изменении структуры или параметров регулятора $R_{ii}(s) = \{R_{ii}^1(s), \dots, R_{ii}^r(s)\}$ будут изменяться характеристики подсистем. Разрыв связей больше влияет на характеристику связей.

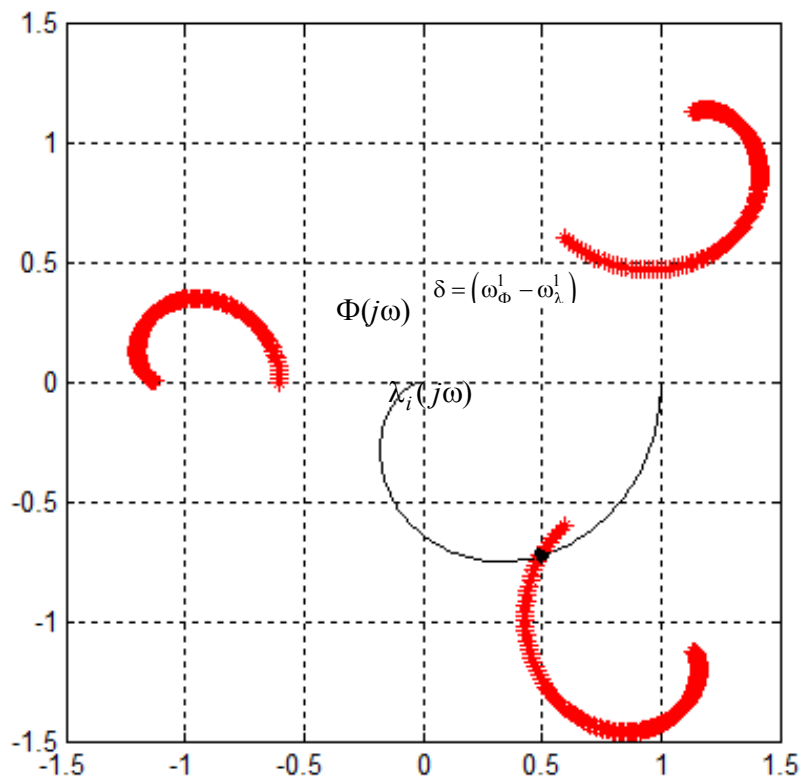


Рис. 3. Годографы подсистем и корневой годограф уравнения связи устойчивой трехсвязной САУ, т. к. $\lambda_{\Phi} \omega - \omega (\delta^1 \quad 1) > 0$

Достоинством частотных метода является то, что их вычислительная сложность определяется в основном размерностью n МСАУ, так как данная размерность определяет порядок решаемого уравнения. Метод не критичен к порядку дифференциального уравнения сепаратных подсистем, обладает хорошей наглядностью и позволяет оценить влияние на устойчивость МСАУ как динамических свойств сепаратных подсистем, так и связей между ними. Если произойдет разрыв или поменяется

структура регулятора в системе, то мы это увидим на картине с характеристиками системы [1, 5].

Заключение

Таким образом, на основе системного описания адаптивной МСАУ через характеристики подсистем и характеристики связей, а также частотных методов можно провести анализ устойчивости исследуемых систем управления при структурных изменениях или в результате разрыва связей, или изменения параметров и структуры самой системы. На основе анализа устойчивости основных структур, реализующих многосвязное управление, можно увидеть в каком случае и как в рамках предложенного подхода при синтезе целесообразно выбирать структуру МСАУ. Определить наиболее рациональную для решения поставленных задач структуру, позволяющую строить гарантированно устойчивые, удовлетворяющие требованиям к качеству управления МСАУ СДО, обеспечивающие требуемые динамические характеристики системы в широком диапазоне изменения условий их функционирования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант РФФИ №18-08-00702 А, Грант РФФИ № 18-08-01299 А).

Список литературы

1. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А.А. Шевяков, Т.С. Мартьянова, В.Ю. Рутковский и др.; под общей ред. А.А. Шевякова, Т.О. Мартьяновой. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
2. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов / В.Ю. Рутковский, Б.Г. Ильясов, Ю.С. Кабальнов и др; под ред. М.Н. Красильщикова. М.: Изд-во МАИ, 1994. 224 с.
3. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Устойчивость и робастная устойчивость однотипных систем // *АиТ*. 1996. № 11. С. 91 – 104. Polyak B.T., Tsypkin Ya.Z. Stability and Robust Stability of Uniform Systems // *Autom. and Remote Control*. 1996. 57:11. Part 1. Pp. 1606–1617.
4. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 399 с.
5. Ильясов Б.Г., Саитова Г.А. Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов // *Автоматика и телемеханика*. 2013. № 3. С. 173–191.