

СИНТЕЗ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЛОГИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ

Ильясов Б.Г.¹, Сабитов И.И.¹

¹ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, e-mail: iskra1990@gmail.com

Сложные динамические объекты представляют собой комплекс подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом. На различных режимах работы параметры связи между сепаратными подсистемами могут существенно изменяться. Для адаптации к таким изменениям многосвязного объекта управления в статье предлагается использовать логические законы управления, позволяющие значительно улучшить качество функционирования системы. Однако существующие логические законы управления не учитывают структурно-параметрические особенности данного класса объектов. Таким образом, проблема синтеза логических законов управления, учитывающих изменение параметров и структуры объекта управления, является актуальной. В статье предложен логический закон управления, формирующий логические связи между подсистемами на основе анализ динамики выходных координат объекта управления. Проведен анализ качества функционирования логического регулятора в составе гомогенной многосвязной системы автоматического управления с различными характеристиками связи между сепаратными подсистемами. По результатам анализа установлено, что предложенный логический закон стабилизирует и согласовывает динамику сепаратных подсистем в составе сложного динамического объекта при различных характерах связи для достижения цели функционирования всей многосвязной системы автоматического управления.

Ключевые слова: многосвязные системы автоматического управления (МСАУ), логические регуляторы, логические законы управления, согласование подсистем, стабилизация динамики.

SYNTHESIS OF MULTIVARIABLE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH THE LOGICAL RELATIONS BETWEEN SUBSYSTEMS

Ильясов Б.Г.¹, Сабитов И.И.¹

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: iskra1990@gmail.com

Complicated dynamic objects are a set of subsystems, interconnecting and interacting with each other. The parameters of relations between separate subsystems can significantly vary in the different modes of functioning. For adaptation to such changes in multivariable controlled object the paper proposes to use the logical control algorithms, which allow to improve the quality of functioning. However, the existing logical control algorithms do not take into account the structural-parametric features of this class of objects. Thus, the problem of synthesis of the logical control algorithms which take into account the change of parameters and structure of the multivariable controlled object is actual. This paper proposes a logic control algorithm, which forms the logical relations between separate subsystems based on the analysis of the dynamics of output coordinates of the controlled object. Carried out a quality functioning analysis of logical controller as a part of homogeneous multivariable automatic control system with different types of relations between separate subsystems. Based on the analysis it has been determined, that the proposed logical algorithm stabilizes and to coordinates the dynamics of separate subsystems in complicated dynamic object at different types of relations, which provides to achieve the purpose of multivariable automatic control system.

Keywords: multivariable automatic control systems, logical controllers, logical control algorithm, coordination of subsystems, stabilization of dynamics.

Современные сложные динамические объекты (СДО) разнообразной физической природы представляют собой комплекс подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом. Примерами таких объектов являются газотурбинные двигатели, летательные аппараты, энергетические комплексы, синхронные генераторы и так далее.

Сложные динамические объекты, как правило, являются нелинейными, многосвязными и многофункциональными – в процессе их функционирования изменяются

динамические свойства как самих сепаратных подсистем, так и связей между ними на различных режимах работы [2]. Таким образом, для обеспечения требований по управляемости современные системы автоматического управления СДО необходимо разрабатывать в классе многосвязных систем автоматического управления (МСАУ).

Основная трудность при проектировании МСАУ СДО заключается в обеспечении устойчивости и желаемого качества функционирования многосвязного объекта управления на различных режимах. Удовлетворить столь сложным техническим требованиям могут, в частности, МСАУ, реализующие логические законы управления.

Логические регуляторы берут на себя функции анализа текущего поведения объекта управления и выработки на основе логического закона сигнала управления. Использование логических регуляторов значительно улучшает динамические и статические свойства системы [3]. Основной задачей, связанной с применением логических регуляторов, является разработка логического закона управления, формирующего сигнал управления с учетом структурных и параметрических особенностей объекта управления. Поэтому задача синтеза логических законов управления, позволяющих согласовать сепаратные подсистемы с учетом их взаимосвязи, является актуальной.

В данной статье предлагается новый логический закон управления, новизна которого, в отличие от существующих аналогов, заключается в формировании логической связи между сепаратными подсистемами в составе МСАУ СДО для обеспечения стабилизации и согласования их динамики.

Постановка задачи

Анализ современных исследований в области логического управления СДО показывает, что существуют различные подходы к решению этой проблемы, однако, как правило, они не учитывают влияние перекрестных связей на динамику многосвязного объекта управления.

В контексте нечеткого логического управления предложены многомерные логические регуляторы, основанные на реализации правил логического вывода, выраженных в как нечетких [6], так и в четких терминах [1]. Зарубежными авторами предложены нечеткие логические регуляторы для управления нелинейными многосвязными объектами [9]. Однако синтез продукционных правил для управления многосвязным объектом, которые были бы адекватны на всем диапазоне функционирования, невероятно сложен, так как на различных режимах работы структура и динамические параметры объекта управления могут существенно изменяться. Такие структурно-параметрические изменения приводят к значительному изменению характера поведения объекта управления и требуют соответствующих изменений продукционных правил. Также, для данного класса регуляторов

не разработаны точные методы проверки устойчивости, но есть попытки адаптации классических аналитических подходов [4].

Широкое распространение как в отечественной [3, 5, 7], так и в зарубежной [8, 10] литературе получили системы с переключением коэффициентов передачи либо в прямой цепи, либо в цепи обратной связи. Переключение в таких системах происходит при определенных соотношениях координат системы, которые определяются логическим законом управления [3]. Однако данные логические законы управления не учитывают взаимовлияние отдельных подсистем, что характерно для МСАУ СДО.

В статье рассматриваются гомогенные МСАУ, состоящие из идентичных отдельных подсистем. Первые исследования гомогенных многосвязных систем были вызваны развитием энергосистем и крупных электрических станций. Теория гомогенных МСАУ берет свое начало в работах А. А. Красовского, В.Т. Морозовского. Целью управления такими объектами является координация и согласование работы всех отдельных подсистем. Для достижения данной цели необходимо разработать логический закон управления, формирующий на основе анализа динамики многосвязного объекта управления логические связи между отдельными подсистем с целью их стабилизации и согласования.

Логический закон управления связями

Проведем синтез логического закона управления, формирующего логическую корректирующую связь $\bar{\varepsilon}_i(t)$ на основе анализа влияния динамики j -х ($j=1\dots n, j \neq i$) отдельных подсистем на динамику собственной i -й ($i=1\dots n$) подсистемы. Структурная схема данного логического закона управления представлена на рис. 1, где $\varepsilon_i(t)$ – ошибка в i -й подсистеме; $\bar{\varepsilon}_i(t)$ – корректирующая ошибка, сформированная с учетом влияния динамики j -х подсистем; $\varepsilon_i^0(t)$ – собственная ошибка в i -й подсистеме.

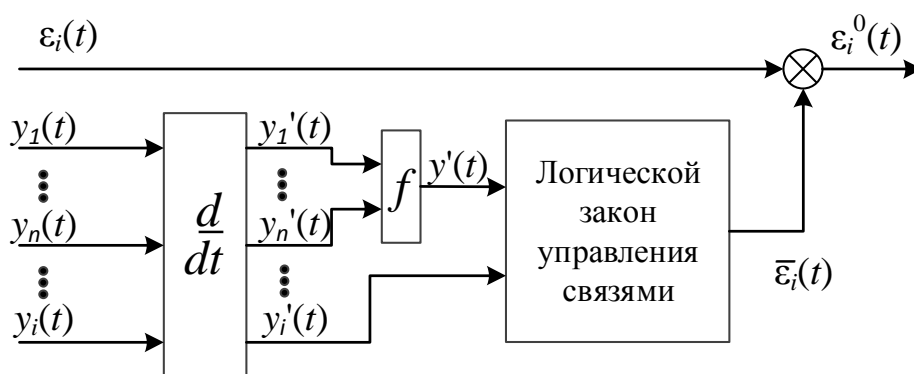


Рис. 1. Структурная схема логического регулятора

Влияние перекрестных связей на качество функционирования отдельных подсистем в составе МСАУ СДО можно оценить на основе анализа динамики выходных координат. Когда выходные координаты i -й и j -й подсистемы изменяются в противоположных направлениях (что соответствует $y_i'(t)y_j'(t) < 0$), то подсистемы не скоординированы между

собой и «мешают» друг другу в достижении цели функционирования. Для их координации необходимо форсировать собственную i -ю подсистему созданием положительной связи по динамике $y_j'(t)$ j -й подсистемы с некоторым коэффициентом K .

В случае, когда выходные координаты i -й и j -х подсистем изменяются в одном направлении (что соответствует $y_i'(t)y_j'(t) \geq 0$), то подсистемы не согласованы между собой и необходимо сравнивать их абсолютные скорости движения. Если абсолютная скорость $|y_i'(t)|$ изменения i -й подсистемы больше абсолютной скорости $|y_j'(t)|$, то i -я подсистема опережает j -ю подсистему и необходимо её замедлять созданием отрицательной связи по динамике $y_j'(t)$ j -й подсистемы с некоторым коэффициентом K .

Рассмотрим МСАУ СДО, состоящую из n сепаратных подсистем. Каждая подсистема, на основе сформированного по заданному критерию совокупного влияния j -х подсистем через перекрестные связи, должна принимать решение о формировании положительной или отрицательной связи для координации и стабилизации всей МСАУ СДО в целом. В качестве критерия предлагается использовать следующую функцию:

$$y'(t) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n y_j'(t)}{n}.$$

Таким образом, логический закон формирования связей описывается следующей функцией:

$$\bar{\varepsilon}_i(t) = \begin{cases} -Ky'(t) & \text{при } (y_i'(t)y'(t) \geq 0) \wedge (|y_i'(t)| > |y'(t)|) \\ 0 & \text{при } (y_i'(t)y'(t) \geq 0) \wedge (|y_i'(t)| \leq |y'(t)|) \\ Ky'(t) & \text{при } (y_i'(t)y'(t) < 0) \end{cases} \begin{matrix} i = 1, \dots, n; \\ j = 1, \dots, n; j \neq i. \end{matrix}$$

где K – параметр, характеризующий силу формируемой логической связи между i -ой и j -ой сепаратной подсистемой, а $y'(t)$ определяется как:

$$y'(t) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n y_j'(t)}{n}.$$

Предлагаемый логический закон на основе анализа динамики многосвязного объекта управления формирует связи между подсистемами, а параметр K определяет силу этой связи.

Проведем анализ качества функционирования МСАУ СДО с предложенным логическим законом формирования связей.

Анализ функционирования МСАУ СДО с предложенным логическим законом формирования связей

Рассмотрим гомогенную трехсвязную систему автоматического управления, структура которой представлена на рис. 2.

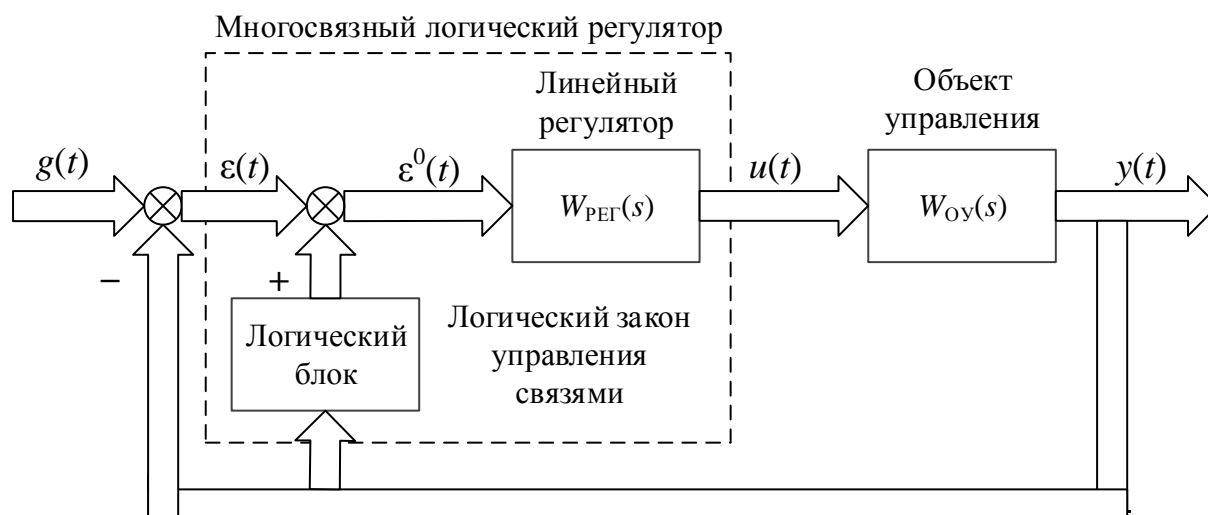


Рис. 2. Структурная схема исследуемой МСАУ СДО

Для описания МСАУ СДО в статье используется подход на основе декомпозиции исследуемой системы на отдельные подсистемы и многомерный элемент связи между ними [4]. Данный подход позволяет анализировать системы любой размерности и наглядно отображает влияние на устойчивость и качество функционирования МСАУ СДО как динамических свойств отдельных подсистем, так и связей между ними, что позволяет в полной мере учесть структурно-параметрические особенности данного класса объектов.

В контексте рассматриваемого подхода вводятся такие понятия как индивидуальная характеристика подсистемы, отражающая её динамические свойства, и характеристика многосвязного элемента связи, выражающая силу и характер связи между подсистемами.

В качестве индивидуальной характеристики подсистемы рассмотрим её передаточную функцию в режиме управления – когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии. Объект управления представляет собой апериодическое звено второго порядка, которое описывается следующей передаточной функцией, где τ_{OY} – постоянная времени объекта управления:

$$W_{OY}(s) = \frac{1}{(\tau_{OY}s + 1)^2}, \quad \text{где } \tau_{OY} = 0,5.$$

В качестве линейного регулятора возьмем пропорционально-интегральный регулятор, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_{PEG}(s) = \frac{K_{II}s + K_{II}}{s}, \quad \text{где } K_{II} = 0,4, K_{II} = 0,5.$$

Так как исследуемая трехсвязная система является гомогенной, то целесообразно использовать обобщенную характеристику многосвязного элемента связи H для описания действия перекрестных связей относительно действия прямых связей в многосвязном объекте управления [4]:

$$H_2 = h_{12} + h_{13} + h_{23},$$

$$H_3 = h_{123}.$$

где h_{ijk} – характеристика связи между группой подсистем.

Рассмотрим характеристику многомерного элемента связи, когда $H_2 > 0$ и $H_3 > 0$. Многомерный элемент связи между сепаратными подсистемами, соответствующий данному характеру связи, описывается следующей матрицей:

$$\mathbf{K}_{oy} = \begin{bmatrix} 1 & -0,8 & 0,7 \\ 0,6 & 1 & -0,5 \\ 0,5 & 0,6 & 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов исследуемой системы представлены на рис. 3.

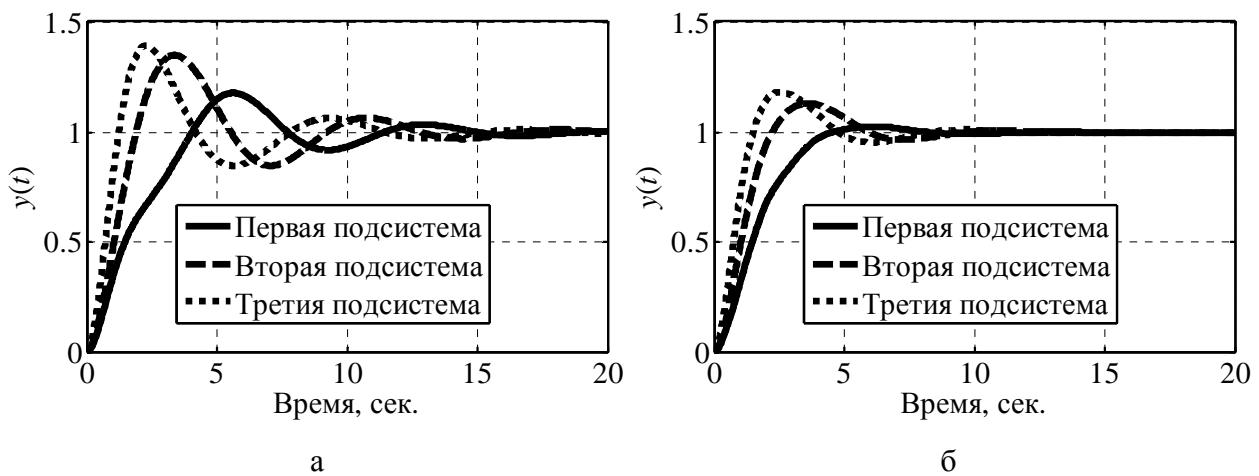


Рис. 3. Графики переходных процессов в исследуемой системе при $H_2 > 0$ и $H_3 > 0$:

а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором

Видно, что в исследуемой системе без логического регулятора наблюдаются значительные колебания переходного процесса. Введение логического регулятор заметно стабилизирует динамики сепаратных подсистем, что приводит к снижению колебательности переходных процессов и уменьшению как перерегулирования, так и времени регулирования.

Рассмотрим характеристику многомерного элемента связи, когда $H_2 < 0$ и $H_3 > 0$. Многомерный элемент связи между сепаратными подсистемами, соответствующий данному характеру связи, описывается следующей матрицей:

$$\mathbf{K}_{oy} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,7 \\ -0,6 & 1 & 1 \\ 0,7 & 0,6 & 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов исследуемой системы представлены на рис. 4.

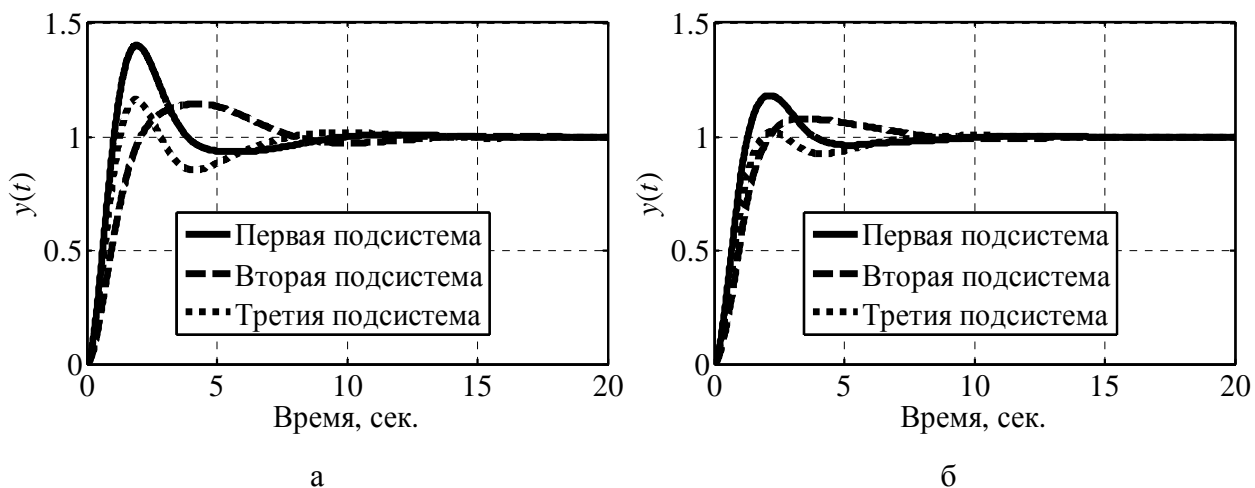


Рис. 4. Графики переходных процессов в исследуемой системе при $H_2 < 0$ и $H_3 > 0$:
а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором

Видно, что в исследуемой системе без логического регулятора наблюдается значительное перерегулирование и «затягивание» переходного процесса. Введение логического регулятора заметно улучшает качество функционирования многосвязной системы, стабилизирует и координирует все сепаратные подсистемы.

Таким образом, преимуществом предложенного логического закона управления является то, что обеспечивается высокое качество управления сепаратной подсистемой за счет введения дополнительных перекрестных связей между регуляторами сепаратных подсистем.

Заключение

Разработана математическая модель закона управления, вырабатывающего корректирующую ошибку $\bar{\varepsilon}_i(t)$ на основе формирования логических связей между сепаратными подсистемами.

Установлено, что предложенный логический регулятор стабилизирует и согласовывает динамику движения каждой сепаратной подсистемы и существенно улучшается качество переходных процессов, что приводит к значительному улучшению качества функционирования многосвязной системы автоматического управления в целом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ 14-08-97056 p_поволжье_a, 14-08-01019 А, 15-08-01146 А).

Список литературы

1. Богданов А.В., Муравьева Е.А., Сазонова Т.В. Многомерный четкий логический регулятор с обработкой продукционных правил в ситуационных подпрограммах // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2012. — № 5. — С. 248-252.

2. Васильев С.Н. и др. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. акад. С. Н. Васильева. — М.: Машиностроение, 2008. — 550 с.
3. Емельянов С.В. Способ получения сложных законов регулирования с использованием лишь сигнала ошибки и ее первой производной // Автоматика и телемеханика. — 1957. — Т.18. №10. — С. 873-885.
4. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А. Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов // Автоматика и телемеханика. — 2013 — № 3. — С. 173-191.
5. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А., Назаров А.Ш. Алгоритм реконфигурации структуры многосвязной системы автоматического управления из условия устойчивости на основе частотных методов // Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16, № 3 (48). — С. 3-10.
6. Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю. Построение адаптивного нечеткого комбинированного регулятора в многосвязных системах // Проблемы управления: научно-техн. журн. — 2006. — № 5. — С. 12-18.
7. Петунин В.И. Особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов // Вестник УГАТУ. — 2008. — Т. 11, № 1 (28). — С. 11-17.
8. Asarin E., Bournez O., Dang T., Maler O., Pnueli A. Effective synthesis of switching controllers for linear systems // Proceedings of the IEEE: Special issue on hybrid systems. — 2000. — V. 88. — P. 1011-1025.
9. Oblak S., Skpjanc I. Multivariable fuzzy predictive control of a MIMO nonlinear system // IEEE International Symposium on Intelligent Control (Limassol, 27-29 June 2005). — Cyprus, 2005. — P. 1029-1034.
10. Sun Z., Ge S. Analysis and synthesis of switched linear control systems //Automatica. — 2005. — V. 41(2). — P. 181-195.

Рецензенты:

Васильев В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и защиты информации» ФБГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа;

Мунасыпов Р.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Мехатронные станочные системы» ФБГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.