

УДК 681.51

Логический закон управления сепаратной подсистемой при структурно-параметрических изменениях многосвязного объекта

Ильясов Б. Г.¹, Саитова Г. А.¹,
Сабитов И. И.^{1,*}

[*iskra1990@gmail.com](mailto:iskra1990@gmail.com)

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия

В работе предложен логический закон управления для адаптации к структурно-параметрическим изменениям многосвязного объекта, который улучшает статические и динамические свойства системы. Разработана математическая модель логического закона управления, формирующего логически корректирующую ошибку на основе анализа текущего состояния и динамики автономной сепаратной подсистемой. Проведен сравнительный анализ существующих логических законов управления с синтезированным законом при структурно-параметрических изменениях характеристики объекта управления. Установлено, что предложенный логический регулятор стабилизирует динамику сепаратной подсистемы и обеспечивает требуемое качество управления без перенастройки параметров.

Ключевые слова: логический закон управления, многосвязный объект, структурно-параметрические изменения, адаптация

Введение

Исследуемые сложные динамические объекты (СДО) представляют собой комплекс различных подсистем, выполняющих определенные технологические операции для достижения целей функционирования и связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия [1]. Современные системы автоматического управления СДО необходимо разрабатывать в классе многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) [2] (например, МСАУ газотурбинным двигателем (ГТД), энергетическими комплексами, синхронными генераторами и т. д.).

Такие системы, как правило, являются нелинейными, многосвязными и многофункциональными – в процессе функционирования изменяются как структурные, так и параметрические свойства многосвязного объекта управления [3].

Известны несколько способов коррекции МСАУ СДО для обеспечения заданного качества функционирования при адаптации к новым условиям: изменение параметров и

структуры регулятора в сепаратной подсистеме для адаптации к структурно-параметрическим изменениям, а также введение дополнительных связей между сепаратными подсистемами для компенсации влияния перекрестных связей [4, 5].

Реализовать столь сложные законы управления с учетом структурно-параметрических особенностей многосвязного объекта управления возможно в классе интеллектуальных систем управления, к которым, в частности, относятся логические регуляторы. Логические регуляторы реализуются в виде нелинейных корректирующих устройств, которые изменяют структуру и значения своих параметров на основании некоторого логического закона. Данные регуляторы позволяют существенно расширить возможности целенаправленного изменения процессов управления, что приводит к улучшению динамических и статических свойств объекта управления [6].

Основной проблемой, связанной с применением логических регуляторов, является разработка логического закона управления, учитывающего не только текущее состояние объекта управления, но и его динамику для обеспечения заданных требований к качеству функционирования системы. Поэтому задача синтеза логических законов управления является актуальной. Решение данной проблемы позволит преодолеть противоречия между точностью, устойчивостью и быстродействием.

В данной статье предлагается новый логический закон управления, новизна которого, в отличие от существующих аналогов, заключается в том, что формируется логический корректирующий сигнал ошибки с учетом динамики сепаратной подсистемы, обеспечивающий адаптацию к структурно-параметрическим изменениям многосвязного объекта управления.

1. Постановка задачи

Проблема синтеза логических регуляторов привлекала внимание исследователей в различное время.

Наиболее широкое распространение в рассматриваемом классе регуляторов получили нечеткие логические регуляторы. В данном классе регуляторов предложены многомерные логические регуляторы, основанные на реализации правил логического вывода, выраженных в как нечетких [7], так и в четких терминах [8]. В работе [9] предлагается построения нечеткого логического регулятора с учетом робастности. В работе [10] предлагается двухуровневая схема настройки, обеспечивающая устойчивость и адаптацию нечеткого логического регулятора к динамике объекта управления. Таким образом, нечеткие логические регуляторы позволяют реализовывать системы управления объектами с существенными нелинейностями [11].

Однако их применение сопряжено с рядом сложностей. Синтез правил логического вывода, которые были бы адекватны на всем диапазоне функционирования, для управления многосвязным объектом невероятно сложен, так как на различных режимах работы характер поведения объекта управления может существенно изменяться. Также достаточно сложно проводить анализ устойчивости систем с нечеткими логическими

регуляторами. Для нечетких логических регуляторов не разработаны точные методы проверки устойчивости [12], но есть попытки адаптации классических аналитических подходов [13].

Также широкое распространение как в отечественной [6, 14, 15], так и в зарубежной [16, 17, 18] литературе получили системы с переключением коэффициентов передачи либо в прямой цепи, либо в цепи обратной связи [19]. Системы такого вида часто используются для управления сложными механическими, электроэнергетическими объектами [20] и достаточно просты в реализации. Переключение в таких системах происходит при определенных соотношениях координат системы, которые определяются логическим законом управления. Предложено множество различных логических законов управления, например, Емельяновым С. В. [24]:

$$\varepsilon_i^0 = \begin{cases} K_1 \varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) \geq 0, \\ K_2 \varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

Стариковой М. В. [6]:

$$\varepsilon_i^0 = \begin{cases} K_1 \varepsilon(t) & \text{при } (T\varepsilon'(t) + k\varepsilon(t))\text{sgn}(\varepsilon(t)) \leq 0, \\ K_2 \varepsilon(t) & \text{при } (T\varepsilon'(t) + k\varepsilon(t))\text{sgn}(\varepsilon(t)) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

Петуниным В. И. и другими.

Общим для этих логических законов управления является то, что переключение происходит в зависимости от значения ошибки $\varepsilon(t)$ и ее производной $\varepsilon'(t)$ [21]. Однако данные логические законы формируют корректирующий сигнал, изменяющий коэффициент усиления сепаратной подсистемы без учета динамической составляющей. Также необходимо отметить, что для обеспечения высокого качества необходим расчет параметров логических законов управления. Поэтому, в статье для решения выделенных проблем предлагается математическая модель логического закона управления, формирующего корректирующий сигнал с учетом текущего состояния и динамики сепаратной подсистемы в составе многосвязного объекта управления.

2. Логический закон управления сепаратной подсистемой

Рассмотрим МСАУ СДО, представленную на рис. 1, где $g_i(t)$, $u_i(t)$, $y_i(t)$ – задающая, управляющая, управляемая координата в i -ой сепаратной подсистеме ($i=1, \dots, n$).

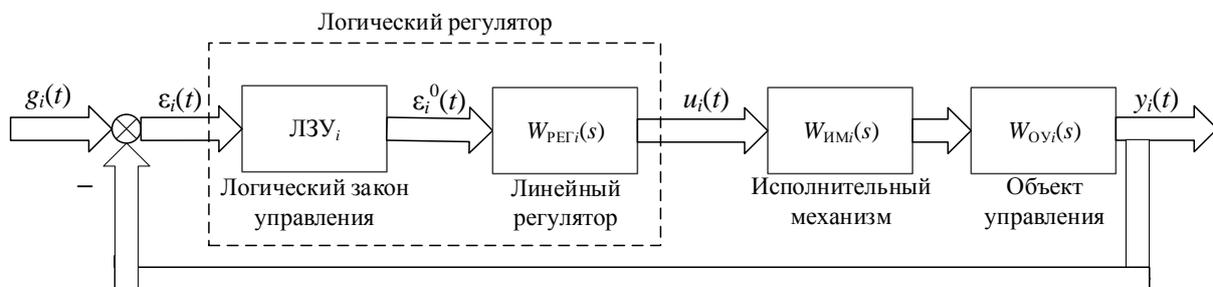


Рис. 1. Структурная схема МСАУ

Структура предлагаемого логического регулятора, формирующего на основе анализа текущего состояния и динамики собственной i -й подсистемы корректирующую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$, представлена на рис. 2.

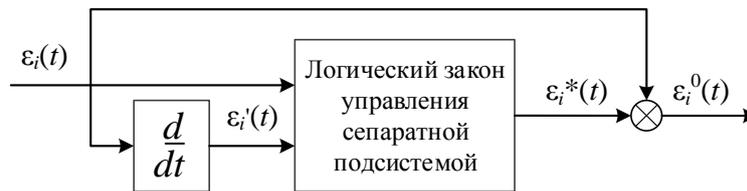


Рис. 2. Структура исследуемого логического регулятора

Поведение объекта управления можно оценить через направление изменения динамики $(\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t))$ с учетом возможного состояния объекта управления $\tau_p\varepsilon_i'(t)$ через промежуток времени τ_p .

Когда модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ увеличивается (что соответствует $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0$, рис. 3 область 3), то необходимо замедлять динамику сепаратной подсистемы добавлением $\varepsilon_i'(t)$. Если же модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ уменьшается (что соответствует $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \leq 0$), то необходимо проводить оценку динамики изменения модуля ошибки $|\varepsilon_i(t)|$.

Если абсолютное значение ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ будет больше возможного абсолютного значения ошибки $\tau_p|\varepsilon_i'(t)|$ через промежуток времени τ_p , то динамика уменьшения ошибка возрастает (рис. 3 область 1) и воздействие не требуется. В ином случае (рис. 3 область 2) необходимо замедлять динамику сепаратной подсистемы добавлением $K(\varepsilon_i(t))\varepsilon_i'(t)$.

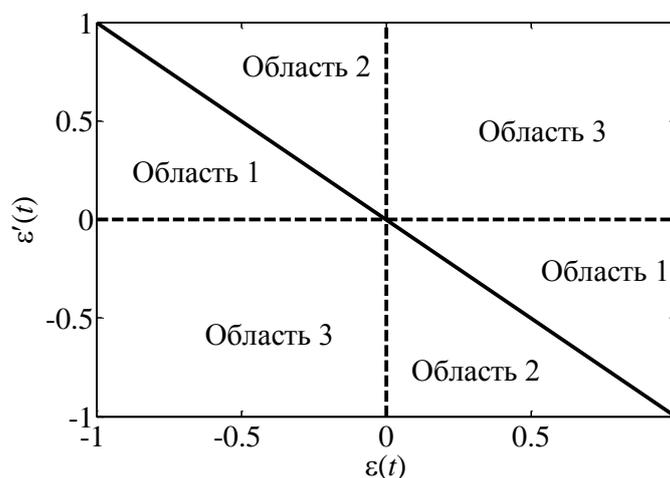


Рис. 3. Области работы логического закона управления

Таким образом, логический закон формирования корректирующей ошибки $\varepsilon_i^*(t)$ описывается следующей функцией:

$$\varepsilon_i^* = \begin{cases} 0 & \text{при } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \leq 0) \wedge (|\varepsilon_i(t)| > \tau_p |\varepsilon_i'(t)|), \\ K(\varepsilon_i(t))\varepsilon_i'(t) & \text{при } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \leq 0) \wedge (|\varepsilon_i(t)| \leq \tau_p |\varepsilon_i'(t)|), \\ \varepsilon_i'(t) & \text{при } (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0). \end{cases} \quad (3)$$

Параметр $K(\varepsilon_i(t))$, характеризующий стабилизацию динамики сепаратной подсистемы логическим регулятором, является неким аналогом функций принадлежности [Error! Reference source not found.22]. Для формирования данного параметра в статье предлагается использовать треугольную функцию:

$$K(\varepsilon_i(t)) = 1 - \frac{|\varepsilon_i(t)|}{\max|\varepsilon_i(t)|}. \quad (4)$$

Данная функция обеспечивает линейное изменение параметра $K(\varepsilon_i(t))$, что способствует равномерному замедлению динамики переходного процесса сепаратной подсистемы.

График формирования корректирующей ошибки $\varepsilon_i^*(t)$ (3) с учетом (4) представлен на рис. 4.

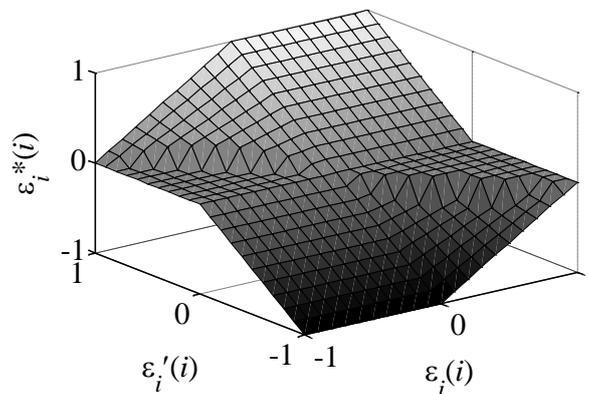


Рис. 4. График формирования сигнала $\varepsilon_i^*(t)$ логическим законом управления

Проведем анализ работы предложенного логического закона управления сепаратной подсистемой в составе МСАУ СДО при структурно-параметрических изменениях многосвязного объекта.

3. Исследование логического закона управления сепаратной подсистемой МСАУ СДО

Рассмотрим гомогенную трехсвязную систему, структура которой представлена на рис. 1. На расчетном режиме объект управления описывается матричной передаточной функцией:

$$W_{0y}(s) = \frac{1}{\tau_{0y}^2 s^2 + 2\tau_{0y}\xi s + 1} K_{0y}, \quad \text{где } \tau_{0y} = 0,5 \text{ сек.}; \xi = 0,9; K_{0y} = \begin{bmatrix} 1 & 0,3 & -0,8 \\ -0,7 & 1 & 0,2 \\ -0,4 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а исполнительный механизм:

$$W_{ИМ}(s) = K_{ИМ}, \text{ где } K_{ИМ} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Линейный регулятор на расчетном режиме описывается матричной передаточной функцией:

$$W_{РЕГ}(s) = \frac{T_{РЕГ}s+1}{s} K_{РЕГ}, \text{ где } T_{РЕГ} = 0,33, K_{РЕГ} = \begin{bmatrix} 0,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0 \\ 0 & 0 & 0,24 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Проведем сравнительный анализ логического закона управления Емельянова С. В. (ЛР₁) (1) и Стариковой М. В. (ЛР₂) (2) с предложенным логическим законом управления (ЛР₃) (3). Параметры регуляторов, реализующих данные законы управления, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры логических регуляторов

Логический регулятор	Параметр	Значение
Логический регулятор Емельянова С. В. (ЛР ₁)	K_1	1,3
	K_2	0,6
Логический регулятор Стариковой М. В. (ЛР ₂)	T	3
	K	4
	K_1	0
Предложенный логический регулятор (ЛР ₃)	K_2	2
	τ_p	0,5

Исследуемая многосвязная система на расчетном режиме функционирует без перерегулирования, а переходные процессы являются монотонными.

Рассмотрим параметрическое изменение многосвязного объекта управления (5) при переходе на новый режим:

$$W_{ОУ}(s) = \frac{1}{0,49s^2 + 0,7s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0,3 & -0,8 \\ -0,7 & 1 & 0,2 \\ -0,4 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов в исследуемой системе представлены на рис. 5.

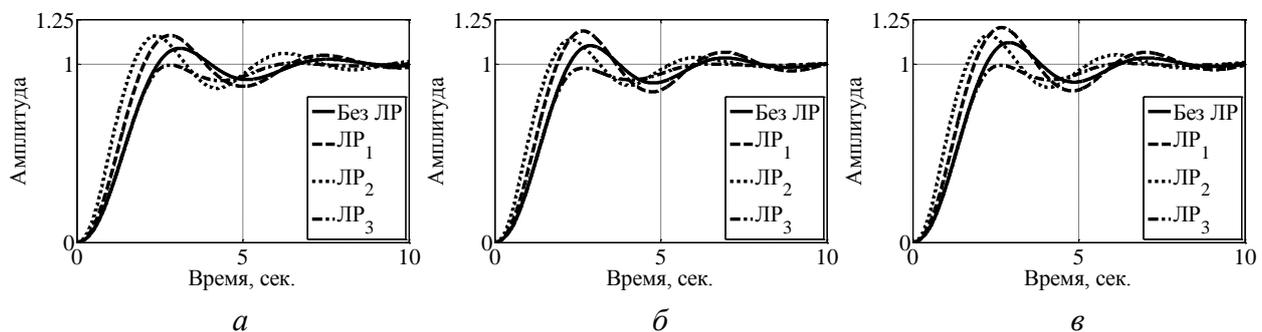


Рис. 5. Графики переходных процессов при параметрическом изменении объекта управления: *а* – в первой подсистеме; *б* – во второй подсистеме; *в* – в третьей подсистеме

Видно, что как при логическом законе Емельянова С. В. (ЛР₁), так и при логическом законе Стариковой М. В. (ЛР₂) в исследуемой системе наблюдаются значительные перерегулирования во всех сепаратных подсистемах, а переходные процессы являются колебательными. Переходные процессы в системе с предложенным логическим законом управления (ЛР₃) характеризуются отсутствием перерегулирования, однако присутствуют некоторые колебания.

Рассмотрим влияние инерционности исполнительного механизма (6) на качество функционирования исследуемой системы:

$$W_{\text{им}}(s) = \frac{1}{0,35s + 1} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов в исследуемой системе представлены на рис. 6.

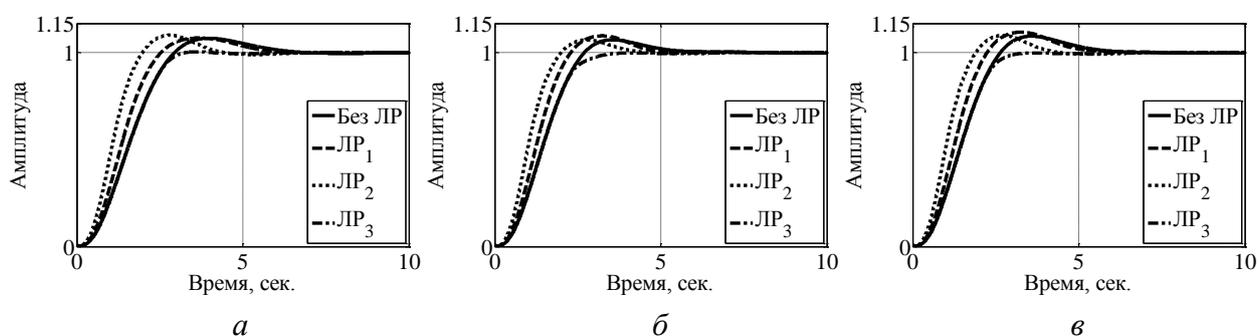


Рис. 6. Графики переходных процессов при структурных изменениях объекта управления:
a – в первой подсистеме; *б* – во второй подсистеме; *в* – в третьей подсистеме

Видно, что и логический регулятор Емельянова С. В. (ЛР₁) и логический регулятор Стариковой М. В. (ЛР₂) форсируют динамику сепаратных подсистем, что приводит к появлению перерегулирования. В исследуемой системе с предложенным логическим регулятором (ЛР₃) переходные процессы являются монотонными, отсутствуют как перерегулирования, так и колебания.

Исследуем влияние чистого запаздывания в многосвязном объекте на качество управления:

$$W_{\text{ов}}(s) = \frac{e^{-0,4s}}{0,25s^2 + 0,9s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0,3 & -0,8 \\ -0,7 & 1 & 0,2 \\ -0,4 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов в исследуемой системе представлены на рис. 7.

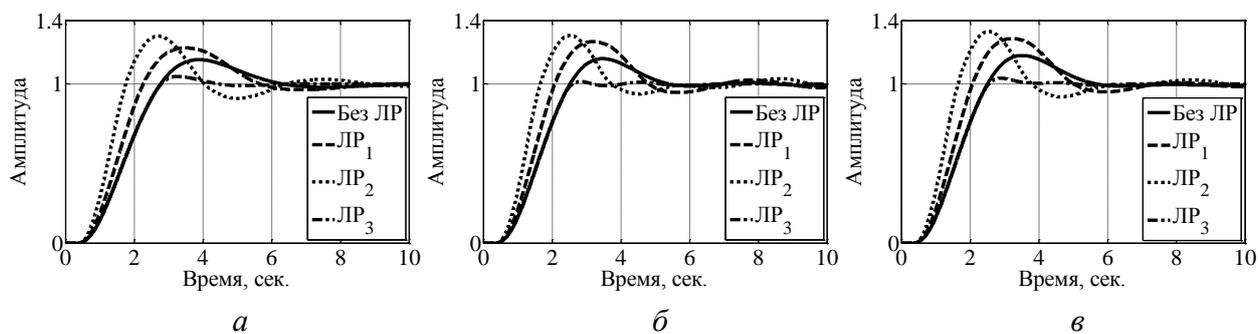


Рис. 7. Графики переходных процессов при чистом запаздывании в объекте управления:
a – в первой подсистеме; *б* – во второй подсистеме; *в* – в третьей подсистеме

Видно, что в исследуемой системе как с логическим регулятором Емельянова С. В. (ЛР₁), так и логическим регулятором Стариковой М. В. (ЛР₂) наблюдаются значительные перерегулирования и колебания переходных процессов. В системе с предложенным логическим регулятором (ЛР₃) качество переходных процессов значительно лучше – перерегулирования значительно меньше, а колебания переходных процессов быстро затухают. Это объясняется тем, что предложенный логический закон управления вырабатывает опережающее решение, которое значительно уменьшает влияние чистого запаздывания в сепаратной подсистеме.

По результатам моделирования было определено, что логические регуляторы Емельянова С.В. (ЛР₁) и Стариковой М. В. (ЛР₂) не обладают свойством адаптации к структурно-параметрическим изменениям многосвязного объекта управления – в сепаратных подсистемах с данными логическими регуляторами наблюдается возрастание перерегулирования, а переходные процессы становятся более колебательными.

Преимуществом предложенного логического закона управления является то, что обеспечивается высокое качество управления сепаратной подсистемой при структурно-параметрических изменениях без перенастройки параметров логического регулятора.

Заключение

Предложена математическая модель логического закона управления сепаратной подсистемой в составе МСАУ СДО. Логический регулятор, реализующий данный закон управления, формирует логическую корректирующую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ на основе анализа как текущего состояния, так и динамики многосвязного объекта управления по сигналам ошибки $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$ соответственно.

По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный логический регулятор обладает свойством адаптации – обеспечивает заданное качество управления при структурно-параметрических изменениях многосвязного объекта. Что, в свою очередь, обеспечивает улучшение качества управления всей многосвязной системой в целом.

Список литературы

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления. В 2 т. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 440 с.
2. Васильев С.Н., Мунасыпов Р.А., Распопов Е.В., Фрид А.И., Черняховская Л.Р. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. акад. С.Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2008. 550 с.
3. Albertos P., Sala A. Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. London: Springer London, 2004. 340 p. (Ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). DOI: [10.1007/b97506](https://doi.org/10.1007/b97506)
4. Рутковский В.Ю., Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. и др. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова. М.: Изд-во МАИ, 1994. 224 с.
5. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 399 с.
6. Старикова М.В. Исследование автоматических систем с логическими управляющими устройствами. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
7. Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Сабитов И.И. Управление многосвязными системами на основе логических регуляторов // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 98-102.
8. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
9. Петунин В.И. Особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 1 (28). С. 11-17.
10. Бураков М.В. Нечеткие регуляторы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2010. 252 с.
11. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.
12. Баркин А.И. Устойчивость линейных систем с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2006. № 3. С. 3-7.

Logical Control Algorithm for the Separate Subsystem with Structural-Parametric Changes in Multivariable Object

B.G. Ilyasov¹, G.A. Saitova¹, I.I. Sabitov^{1,*}

[*iskra1990@gmail.com](mailto:iskra1990@gmail.com)

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Keywords: logical control algorithm, multivariable object, structural-parametric changes, adaptation

Modern complicated dynamic objects are a set of related subsystems with parameters and structure, which may vary in different operating modes.

For adaptation to structural-parametric changes in multivariable controlled object the logical control algorithms are often used. They can significantly improve the dynamic and static properties of the system. However, existing logical control algorithms do not take into account a dynamics of the controlled object. Therefore, calculation of parameters for the logical controller is required to ensure the specified quality of control processes. Thus, there is a relevant problem of synthesis of the logical control algorithms that take into account the change of parameters and structure of the controlled object. A solution of this problem will allow us to overcome the contradiction between accuracy, stability, and performance.

The article proposes a mathematical model of the logical algorithm to control the autonomous separate subsystem by the error signal and its derivative. This algorithm creates a logically correcting error based on the analysis of the current state and dynamics of a separate subsystem.

The article offers a comparative analysis of the existing logical control algorithm with synthesized one when structural-parametric characteristic of controlled object has been changed. Existing algorithms of logic control accelerate dynamics of autonomous separate subsystem thus leading to a significant deterioration in the quality of transition processes. The synthesized logic control algorithm stabilizes dynamics of autonomous separate subsystem and provides a required quality of control processes. In autonomous separate subsystem with a pure time delay the logical control algorithm elaborates a leading decision that significantly reduces the overshoot and oscillability of transition process.

The proposed logical controller is capable of adapting to the structural-parametric changes of the multivariable controlled object without readjusting its parameters. The simulation proves that application of logic controller is efficient.

References

1. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. V 2 t. T. 2. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Theory of automatic control. In 2 vols. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007. 440 p. (in Russian).
2. Vasil'ev S.N., Munasyrov R.A., Raspopov E.V., Frid A.I., Chernyakhovskaya L.R. *Intellektual'nye sistemy upravleniya i kontrolya gazoturbinnnykh dvigateley* [Intelligent control and monitoring systems of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 550 p. (in Russian).
3. Albertos P., Sala A. *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach*. London, Springer London, 2004. 340 p. (Ser. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*). DOI: [10.1007/b97506](https://doi.org/10.1007/b97506)
4. Rutkovskiy V.Yu., Il'yasov B.G., Kabal'nov Yu.S., et al. *Adaptivnye sistemy upravleniya gazoturbinnymi dvigatelyami letatel'nykh apparatov* [Adaptive control systems of aircraft gas turbine engines]. Moscow, MAI Publ., 1994. 224 p. (in Russian).
5. Tsyarkin Ya.Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 399 p. (in Russian).
6. Starikova M.V. *Issledovanie avtomaticheskikh sistem s logicheskimi upravlyayushchimi ustroystvami* [The study of automatic systems with logical control devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 224 p. (in Russian).
7. Il'yasov B.G., Saitova G.A., Sabitov I.I. Control of multivariable systems by logical regulators. *Vestnik UGATU*, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 98-102. (in Russian).
8. Emel'yanov S.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy* [Automatic control system with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 336 p. (in Russian).
9. Petunin V.I. Features of synthesis of multicoupling systems of automatic control with a channel selector. *Vestnik UGATU*, 2008, vol. 11, no. 1 (28), pp. 11-17. (in Russian).
10. Burakov M.V. *Nechetkie regulatory* [Fuzzy controllers]. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation Publ., 2010. 252 p. (in Russian).
11. Gromov Yu.Yu., Zemskoy N.A., Lagutin A.V., Ivanova O.G., Tyutyunnik V.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s zapazdyvaniem* [Automatic control systems with delay]. Tambov, TSTU Publ., 2007. 76 p. (in Russian).
12. Barkin A.I. Stability of linear time-delay systems. *Avtomatika i telemekhanika*, 2006, no. 3, pp. 3-7. (English translation: *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 3, pp. 345-349. DOI: [10.1134/S0005117906030015](https://doi.org/10.1134/S0005117906030015)).