

УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСВЯЗНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Б. Г. Ильясов¹, Г. А. Саитова², И. И. Сабитов³

¹ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, ²saitova@bk.ru, ³iskra1990@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 13.11.2013

Аннотация. Предлагается логический регулятор для многосвязных систем автоматического управления. Описывается его структура и логический закон управления, а также приводятся демонстрационные примеры.

Ключевые слова: логический регулятор; многосвязная система автоматического управления.

Во многих практических случаях возникает необходимость автоматизировать процессы, протекающие в сложных динамических системах, включающих в себя несколько подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом [1]. Характерными свойствами таких систем являются нелинейность, многомерность, многосвязность и многофункциональность, т. е. в процессе нормальной работы изменяется как компоновка системы, так и динамические свойства самих сепаратных подсистем [2]. Примерами таких современных систем являются многосвязные системы автоматического управления (МСАУ) сложными динамическими объектами, такими как газотурбинный двигатель (ГТД), энергетические комплексы, синхронные генераторы и так далее. По данным американской компании Honeywell, проанализировавшей работу более чем 100 000 контуров регулирования в 350 производственных процессах, около 49 % контуров управления настроены неверно или ошибочно [3]. Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и желаемого качества функционирования как МСАУ в целом, так и ее сепаратных подсистем на различных рабочих режимах [4]. Поэтому достижение желаемого качества функционирования многосвязной системы является актуальной практической и теоретической задачей. В статье для решения данной задачи предлагается использовать логические регуляторы в сепаратных каналах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим многосвязную систему автоматического управления, представленную на рис. 1.

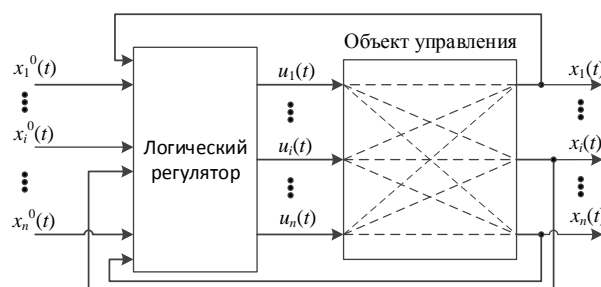


Рис. 1. Структурная схема МСАУ

В современных МСАУ для улучшения динамических свойств часто применяются нелинейные элементы и связи, реализованные в виде нелинейных регуляторов [5]. Использование нелинейных алгоритмов значительно расширяет возможности целенаправленного изменения качества процессов управления, а также позволяет улучшить динамические и статические свойства системы [6].

Среди данного класса регуляторов широкое распространение получили регуляторы с логическим переключением коэффициентов передачи либо в прямой цепи, либо в цепи обратной связи [7]. Переключение в таких системах происходит при определенных соотношениях координат системы, которые определяются логическим законом управления. Существует множество различных логических законов управления

[8, 9], например, разработанный С. В. Емельяновым [10]:

$$u(t) = \begin{cases} k_1 \varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) > 0, \\ k_2 \varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) < 0 \end{cases}$$

и М. В. Стариковой [7]:

$$u(t) = \begin{cases} k_1 \varepsilon(t) & \text{при } (T\varepsilon'(t) + k\varepsilon(t))\text{sign}(\varepsilon(t)) \leq 0, \\ k_2 \varepsilon(t) & \text{при } (T\varepsilon'(t) + k\varepsilon(t))\text{sign}(\varepsilon(t)) > 0. \end{cases}$$

Общим для этих логических законов управления является то, что переключение происходит в зависимости от значения координаты ошибки $\varepsilon(t)$ и ее производной $\varepsilon'(t)$. Однако данные законы логического управления разработаны для систем с одним входом и выходом, и не учитывают взаимовлияние сепаратных каналов, что характерно для МСАУ. А также для них необходимо каждый раз рассчитывать значения коэффициентов при изменении параметров объекта управления для обеспечения высокого качества управления.

Таким образом, требуется разработать многосвязный логический регулятор, формирующий сигнал управления не только на основе движения собственного i -го канала, но и с учетом динамики остальных j -х каналов.

СИНТЕЗ ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Логический регулятор состоит из пропорционально – интегрального (ПИ) регулятора и логического преобразователя координаты ошибки. Логический преобразователь в свою очередь состоит из блока формирования координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ на основе влияния динамики остальных каналов по координате $x_j'(t)$ ($j = 1, \dots, n; j \neq i$) на координату $x_i(t)$ i -го канала ($i = 1, \dots, n$), и блока анализа координаты ошибки, выработывающего на основе сформированной ко-

ординаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ логически скорректированную координату ошибку $\varepsilon_i^*(t)$. Каждый из них реализует свой логический закон управления, который описан ниже.

Структурная схема логического регулятора для i -го канала представлена на рис. 2, где $x_i^0(t)$ – управляющая координата в i -м канале; $x_i(t)$ – управляемая координата в i -м канале; $\varepsilon_i(t)$ – координата ошибки в i -м канале; $\bar{\varepsilon}_i(t)$ – сформированная координата ошибки с учетом влияния динамик j -х каналов; $\varepsilon_i^*(t)$ – логически скорректированная координата ошибки с учетом движения собственного i -го канала; $u_i(t)$ – сигнал управления в i -м канале.

Рассмотрим логический закон блока формирования координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$. Влияние j -х каналов на i -й канал через связи можно определить с помощью попарного сравнения производных по выходным координатам [11].

Когда производные выходных координат i -го $x_i'(t)$ и j -го каналов $x_j'(t)$ разного знака, то j -й канал замедляет движение i -го канала и необходимо форсировать движение добавлением доли $K_{ускр}x_j'(t)$. В случае, когда производные выходных координат i -го $x_i'(t)$ и j -го каналов $x_j'(t)$ одного знака и абсолютное значение производной i -го канала $|x_i'(t)|$ больше абсолютного значения производной j -го канала $|x_j'(t)|$, то j -й канал форсирует движение в i -м канале и поэтому необходимо замедлять движение в i -м канале вычитанием доли $K_{зам}x_j'(t)$.

Таким образом, функционирование блока формирования координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ с учетом динамики остальных каналов описывается следующей функцией:

$$\bar{\varepsilon}_i(t) = \varepsilon_i(t) + \frac{1}{n} \sum_{j=1, j \neq i}^n \bar{f}_{ij}(x_i'(t), x_j'(t)),$$

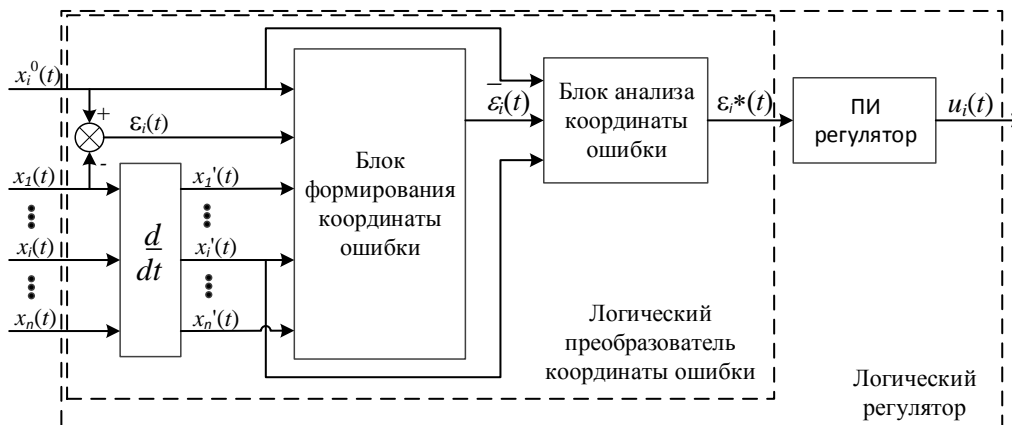


Рис. 2. Структурная схема логического регулятора в i -м канале

где $\bar{f}_{ij}(x_i'(t), x_j'(t))$ – следующий логический закон формирования ошибки:

$$\bar{f}_{ij}(x_i'(t), x_j'(t)) = \begin{cases} -K_{\text{зам}x_j}(t) & \text{при } (x_i'(t)x_j'(t) \geq 0) \wedge (|x_i'(t)| > |x_j'(t)|) \\ 0 & \text{при } (x_i'(t)x_j'(t) \geq 0) \wedge (|x_i'(t)| \leq |x_j'(t)|) \\ K_{\text{ускр}x_j}(t) & \text{при } (x_i'(t)x_j'(t) < 0) \end{cases}$$

где $K_{\text{ускр}}$ и $K_{\text{зам}}$ определяются как

$$K_{\text{зам}} = 1 + \left| \frac{x_i'(t) - x_j'(t)}{f_{\text{ном}}(x_i^0(t))} \right|; \quad K_{\text{ускр}} = \left| \frac{x_i'(t) - x_j'(t)}{f_{\text{ном}}(x_i^0(t))} \right|$$

Функция нормирования $f_{\text{ном}}(x_i^0(t))$ относительно изменения входной величины $x_i^0(t)$:

$$f_{\text{ном}}(x_i^0(t)) = \begin{cases} x_i^0(t) & \text{при } x_i^0(t) = x_i^0(t-1), \\ |x_i^0(t) - x_i^0(t-1)| & \text{при } x_i^0(t) \neq x_i^0(t-1). \end{cases}$$

Рассмотрим логический закон блока анализа координаты ошибки. Данный блок на основе анализа сформированной координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ и производной выходной координаты $x_i'(t)$ вырабатывает скорректированную координату ошибки $\varepsilon_i^*(t)$.

Когда в i -м канале координата сформированной ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ и производная выходной координаты $x_i'(t)$ разного знака, то абсолютное значение координаты ошибки $|\bar{\varepsilon}_i(t)|$ будет увеличиваться и необходимо замедлять движение в канале вычитанием доли $K_{\text{зам}x_i}(t)$. В случае, когда координата сформированной ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ и производная выходной координаты $x_i'(t)$ одного знака, необходимо сравнивать их абсолютные значения. Если же абсолютное значение координаты ошибки $|\bar{\varepsilon}_i(t)|$ больше абсолютного значения производной выходной координаты $|x_i'(t)|$, то значение координаты ошибки постепенно уменьшается и необходимо форсировать движение в канале добавлением доли $K_{\text{ускр}x_i}(t)$. Иначе значение координаты ошибки быстро уменьшается и необходимо замедлить движение в канале вычитанием доли $K_{\text{зам}x_i}(t)$.

Таким образом, функционирование блока анализа ошибки описывается следующей функцией:

$$\varepsilon_i^*(t) = \bar{\varepsilon}_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j^*(\bar{\varepsilon}_i(t), x_i'(t)),$$

где $f_j^*(\bar{\varepsilon}_i(t), x_i'(t))$ – следующий логический закон анализа ошибки:

$$f_j^*(\bar{\varepsilon}_i(t), x_i'(t)) = \begin{cases} K_{\text{ускр}x_j}(t) & \text{при } (\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t) \geq 0) \wedge (|\bar{\varepsilon}_i(t)| > |x_i'(t)|) \\ -K_{\text{зам}x_j}(t) & \text{при } (\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t) \geq 0) \wedge (|\bar{\varepsilon}_i(t)| \leq |x_i'(t)|) \\ -K_{\text{зам}x_j}(t) & \text{при } (\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t) < 0) \end{cases}$$

где $K_{\text{ускр}}$ и $K_{\text{зам}}$ определяются как

$$K_{\text{зам}} = 1 + \left| \frac{\bar{\varepsilon}_i(t) - \tau x_i'(t)}{f_{\text{ном}}(x_i^0(t))} \right|; \quad K_{\text{ускр}} = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_i(t) - \tau x_i'(t)}{f_{\text{ном}}(x_i^0(t))} \right|,$$

где τ – постоянная времени $(0.95 \div 1)$.

Предложенный логический регулятор позволяет формировать управляющий сигнал для каждого сепаратного канала МСАУ на основе движения собственного канала с учетом влияния динамики остальных каналов.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим трехсвязную систему с передаточной функцией объекта управления:

$$W_{\text{ов}}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.275s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.9 \\ 0.75 & 1 & 0.6 \\ 0.65 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

Параметры ПИ-регулятора для каждого сепаратного канала рассчитываются любым из известных способов без учета связей:

$$W_{\text{ПИ}}(s) = \frac{0.25s + 0.28}{s}.$$

Графики переходных процессов МСАУ с различными регуляторами: с ПИ-регулятором, с логическим регулятором М. В. Стариковой и с предложенным регулятором в каждом сепаратном канале при единичном ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 3. В системе с логическим регулятором М. В. Стариковой наблюдается небольшое перерегулирование. Однако оба логических регулятора обеспечивают высокое качество переходных процессов, в отличие от системы с ПИ-регулятором, которая характеризуется большим перерегулированием и колебаниями.

В исследуемой трехсвязной системе изменим коэффициенты связи:

$$W_{\text{ов}}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.275s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.9 \\ -0.75 & 1 & -0.6 \\ 0.65 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов МСАУ с измененными коэффициентами связи при ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 4. Видно, что в данной системе предложенный логический регулятор лучше остальных справляется с колебаниями, вызванными противоположными по знаку связями, заметно уменьшает перерегулирование и стабилизирует переходные процессы в МСАУ.

В исследуемой трехсвязной системе изменим параметры объекта:

$$W_{\text{ов}}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 1.63s^2 + 1.705s + 1} \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.9 \\ 0.75 & 1 & 0.6 \\ 0.65 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

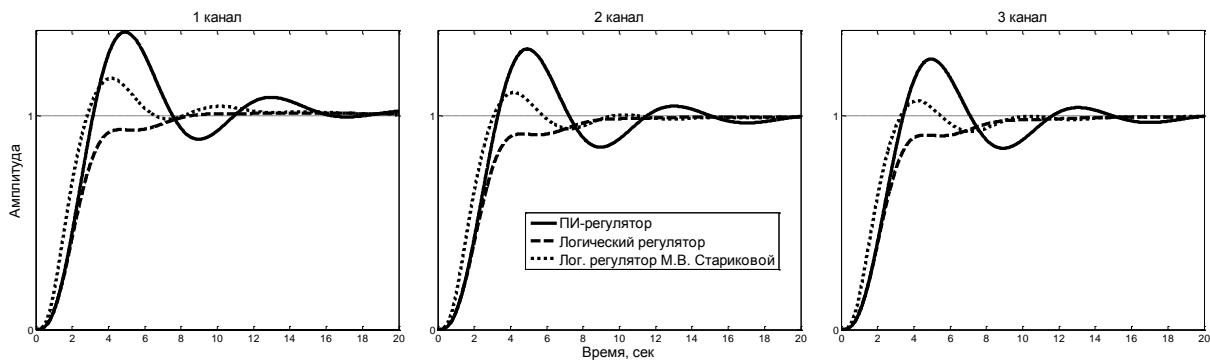


Рис. 3. Графики переходных процессов в исходной системе

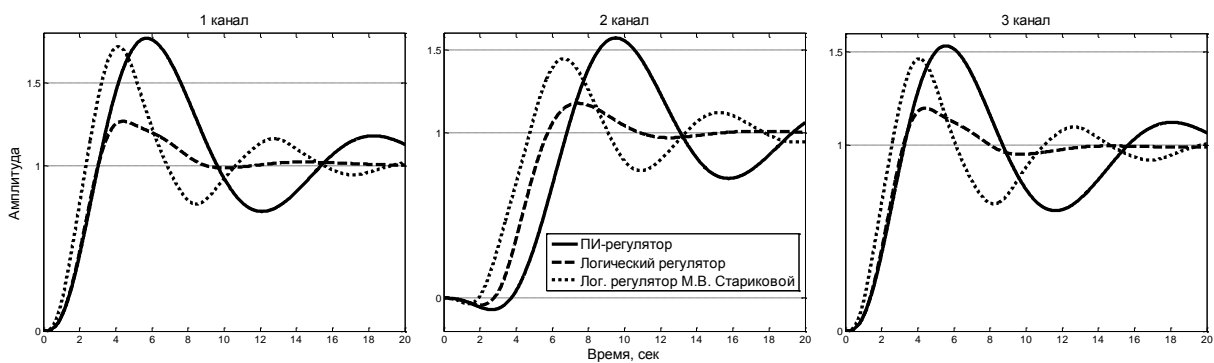


Рис. 4. Графики переходных процессов в системе с измененными коэффициентами связи

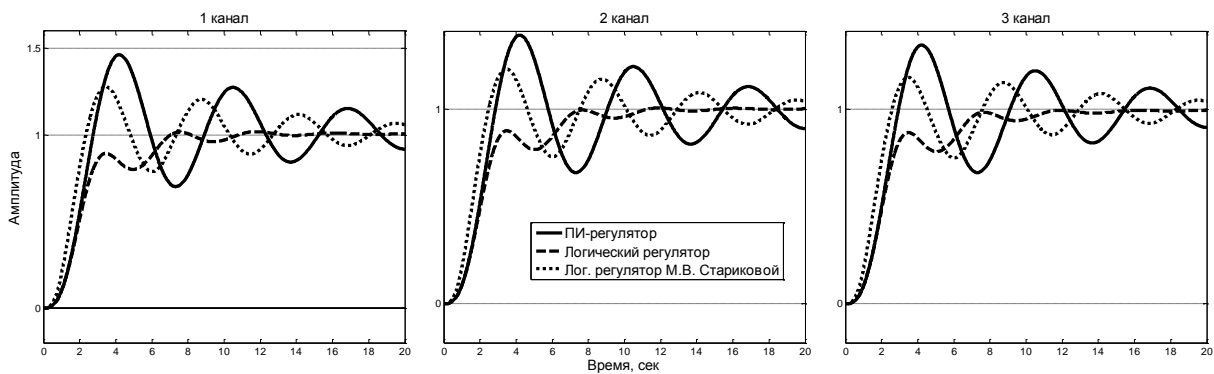


Рис. 5. Графики переходных процессов в системе с измененными параметрами объекта управления

Графики переходных процессов МСАУ с измененными параметрами объекта управления при ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 5. Видно, что при изменении параметров объекта предложенный логический регулятор стабилизирует систему, заметно уменьшает колебательность системы и значительно улучшает качество переходного процесса.

Преимуществом данного регулятора является то, что обеспечивается более высокое качество управления в многосвязной системе при из-

менении параметров многосвязного объекта в процессе его функционирования без перенастройки самого регулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен логический закон управления МСАУ, в котором каждая подсистема принимает решение о стабилизации своей координаты на основе логического анализа как движения собственного канала, так и влияния динамики остальных подсистем.

Установлено, что предложенный логический регулятор обладает свойством адаптации к изменению как связей, так и параметров много-связного объекта.

Разработанный логический регулятор реализован в виде программного блока в Matlab Simulink и может использоваться при синтезе МСАУ сложными динамическими объектами, такими как газотурбинный двигатель (ГТД), энергетические комплексы, синхронные генераторы и так далее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления: учеб. пособие. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с. [D. Kim, *Theory of automatic control. Vol. 2. Multivariable, nonlinear, optimal and adaptive systems*, (in Russian). Moscow: FIZMATLIT, 2004.]
2. **Albertos P., Antonio S.** Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, London: Springer-Verlag London, 2004. 340 p. [P. Albertos, S. Antonio, *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach: Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, London: Springer-Verlag London, 2004.]
3. **Wang Q.-G., Nie Z.-Y.** PID Control for MIMO Processes // PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches, *Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag London, 2012. P. 177–204. 599 p. [Q.-G. Wang, Z.-Y. Nie, "PID Control for MIMO Processes," in *PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches, Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag London, 2012. P. 177-204.]
4. **Ильясов Б. Г. и др.** Анализ устойчивости систем автоматического управления: учеб. пособие / под ред. Б. Г. Ильясова. Уфа: УГАТУ, 2006. 204 с. [B. G. Ilyasov, et al., *Stability analysis of automatic control systems: the textbook*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2006.]
5. **Дорф Р., Бишоп Р.** Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. [R. Dorf, R. Bishop, *Modern control systems*, (in Russian). Moscow: Laboratorija Bazovyh Znanij, 2002.]
6. **Васильев С. Н. и др.** Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. акад. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2008. 550 с. [S. N. Vasiliev, et al., *Intelligent control and monitoring systems of gas turbine engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2008.]
7. **Старикова М. В.** Исследование автоматических систем с логическими управляющими устройствами / под ред. Б. Н. Петрова. М.: Машиностроение, 1978. 224 с. [M. V. Starikova, *Research of automatic control systems with logical devices*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1978.]
8. **Каяшев А. И. и др.** Четкий логический регулятор температуры в автоклаве для производства газосиликатных шлакоблоков // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 2 (42). С. 114–118. [A. I. Kajashev, et al., "Temperature logic controller in the autoclave for the production of silicate slag blocks," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 2 (42), pp. 114-118, 2011.]
9. **Петунин В. И.** Особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 1 (28). С. 11–17.

[V. I. Petunin, "Features of synthesis of automatic multivariable control systems with channel selector," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 11, no. 1 (28), pp. 11-17, 2008.]

10. **Шевяков А. А. и др.** Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / Под общ. ред. А. А. Шевякова и Т. С. Мартыновой. М.: Машиностроение, 1989. 256 с. [A. A. Shevjakov, et al., *Optimization of multivariable control systems of gas turbine aircraft engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1989.]

11. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 368 с. [W. H. Ray, *Advanced process control*, (in Russian). Moscow: Mir, 1983.]

ОБ АВТОРАХ

ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич, зав. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж.-электромех. по авиац. электрооборуд. ЛА (МАИ, 1962). Д-р техн. наук по сист. анализу и авт. упр. (ЦИАМ, 1983). Засл. деят. науки и техн. РФ, чл.-кор. АН РБ, проф. Иssl. в обл. сист. анализа, упр. в техн. и соц.-экон. системах, иерархич. моделей и сит. управления.

САИТОВА Гузель Асхатовна, доц. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж. по автом. процессов обр. и выдачи инф. (УАИ, 1986). Канд. техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информации (УГАТУ, 2003). Иssl. в обл. многосвязн. систем управления.

САБИТОВ Искандер Ильдарович, асп. каф. техн. кибернетики. Дипл. магистр-инж. по сист. анализу и упр. (УГАТУ, 2013). Иssl. в обл. лог. упр. многосвязн. систем.

METADATA

Title: Control of multivariable systems by logical regulators.

Authors: B. G. Ilyasov, G. A. Saitova, I. I. Sabitov¹

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

Email: ¹iskra1990@gmail.com.

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 98-102, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper suggests offers logic regulator for multivariable control systems. Describes its structure, logic control algorithms and gives examples.

Key words: Multivariable control systems; logical regulators.

About authors:

ILYASOV, Bary Galeevich, the honored worker in sci. and tech., corresponding member of the acad. of Sci. of Bashkor. Republ., Prof., Head of tech. cybernetics department. Electromechanical engineer on aviation electrical system of aircraft (MAI, 1962). Dr. of Tech. Sci. (CIAM, 1983).

SAITOVA, Guzel Ashatovna, associate professor of tech. cybernetics department. Engineer on automation of information processing and providing (UAI, 1986). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2003).

SABITOV, Iskander Ildarovich, Postgrad. (PhD) student of tech. cybernetics department. Master in engineering of system analysis and control (USATU, 2013).