

УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСВЯЗНЫМИ СИСТЕМАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Б.Г. Ильясов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, 450000, Уфа, К. Маркса ул., 12
E-mail: ilyasov@tc.ugatu.ac.ru

Г.А. Сaitова

Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, 450000, Уфа, К. Маркса ул., 12
E-mail: saitova@bk.ru

И.И. Сабитов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, 450000, Уфа, К. Маркса ул., 12
E-mail: iskra1990@gmail.com

Ключевые слова: логический регулятор, многосвязная система автоматического управления, запаздывание

Аннотация: В работе предлагается логический регуляторов для многосвязных систем автоматического управления с запаздыванием. Описывается его структура и логический закон управления, а также приводятся демонстрационные примеры.

1. Введение

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 и многосвязность. Добавим, что управление многосвязными объектами осложняется в случае, если в них присутствует запаздывание [2]. Примером таких объектов могут служить воздухозаборники и реактивные двигатели на переходных режимах, ленточные транспортеры, химические реакторы и т.д. [3, 4]. Задача управления объектами с запаздыванием достаточно сложная. Наличие запаздывания в контуре управления ведет к возрастанию фазового сдвига, что может вызвать неустойчивость замкнутой системы даже при небольших коэффициентах усиления регуляторов [5, 6].

Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и желаемого качества функционирования как МСАУ в целом, так и её сепаратных подсистем на различных рабочих режимах [7]. Поэтому достижение желаемого качества функционирования многосвязной системы с запаздыванием является актуальной практической и теоретической задачей. В статье для решения данной задачи предлагается использовать логические регуляторы в сепаратных каналах.

2. Постановка задачи

Рассмотрим систему автоматического управления многосвязным объектом, содержащим элементы чистого запаздывания в прямых и перекрестных каналах связи, представленную на рис. 1.

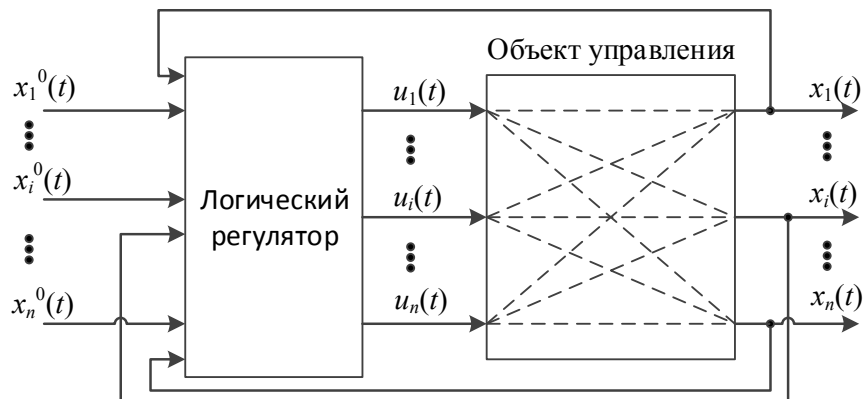


Рис. 1. Структурная схема МСАУ.

В современных МСАУ для улучшения динамических свойств часто используются нелинейные элементы и связи, реализованные в виде нелинейных регуляторов [8]. Среди данного класса регуляторов широкое распространение получили регуляторы с логическим переключением коэффициентов передачи либо в прямой цепи, либо в цепи обратной связи [4]. Использование нелинейных алгоритмов значительно расширяет возможности целенаправленного изменения качества процессов управления, а также позволяет улучшить динамические и статические свойства системы [9].

Переключение в таких системах происходит при определенных соотношениях координат системы, которые определяются логическим законом управления. Существует множество различных логических законов управления [10, 11], например, разработанных С.В. Емельяновым [12]:

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

и М.В. Стариковой [13]:

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

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 отдельных 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.

В данной статье для решения этой проблемы предлагается использование логических регуляторов в отдельных каналах, которые учитывают не только значение координаты ошибки в канале $\varepsilon_i(t)$ и производную по выходной координате $x_i'(t)$ ($i=1, \dots, n$), но и производные по выходным координатам остальных каналов МСАУ $x_j'(t)$ ($j=1, \dots, n; j \neq i$). Регулирование по координатам $x_i'(t)$ и $x_j'(t)$ стабилизирует переходный процесс в систе-

ме. Для повышения качества управления логический регулятор уменьшает или увеличивает долю $x_i'(t)$ и $x_j'(t)$ в сигнале управления в соответствии с заданным законом управления.

Таким образом, требуется разработать многосвязный логический регулятор для многосвязного объекта управления с чистым запаздыванием в прямых и перекрестных каналах связи, формирующий сигнал управления не только на основе движения собственного i -ого канала, но и с учетом динамики остальных j -ых каналов.

3. 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 -ого канала ($i=1, \dots, n$), и блока анализа координаты ошибки, вырабатывающего на основе сформированной координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$ логически скорректированную координату ошибки $\varepsilon_i^*(t)$. Каждый из них реализует свой логический закон управления, который описан ниже.

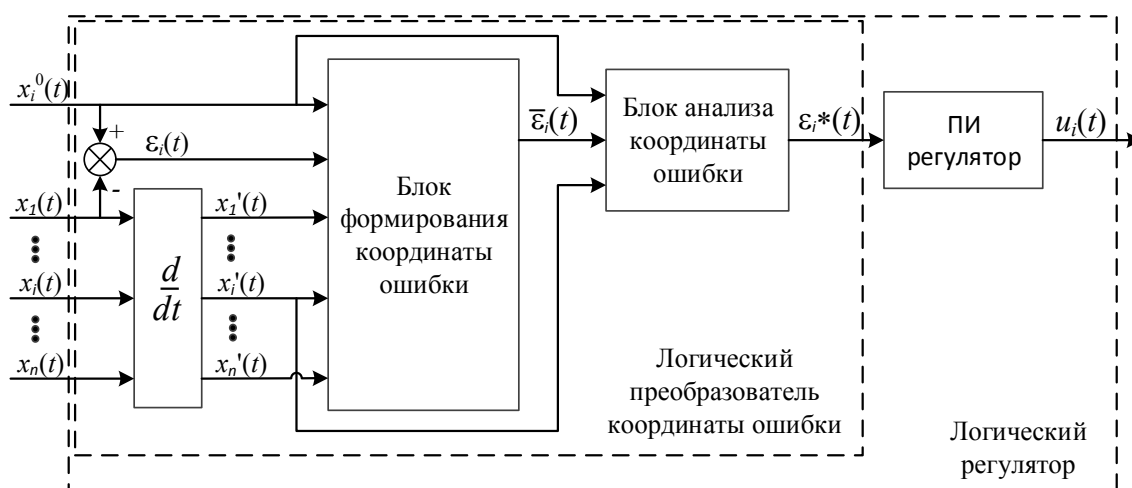


Рис. 2. Структурная схема логического регулятора в i -ом канале.

Структурная схема логического регулятора для i -того канала представлена на рис. 2, где $x_{i0}(t)$ – управляющая координата в i -том канале; $x_i(t)$ – управляемая координата в i -том канале; $\varepsilon_i(t)$ – координата ошибки в i -том канале; $\bar{\varepsilon}_i(t)$ – сформированная координата ошибки с учетом влияния динамик j -тых каналов; $\varepsilon_i^*(t)$ – логически скорректированная координата ошибки с учетом движения собственного i -того канала; $u_i(t)$ – сигнал управления в i -том канале;

Рассмотрим логический закон блока формирования координаты ошибки $\bar{\varepsilon}_i(t)$. Влияние j -тых каналов на i -тый канал через связи можно определить с помощью парного сравнения производных по выходным координатам [9].

Когда произведение производных i -того и j -того каналов $x_i'(t)x_j'(t)$ больше нуля и абсолютное значение производной i -того канала $|x_i'(t)|$ больше абсолютного значения j -того $|x_j'(t)|$, то j -тый канал форсирует движение в i -том и поэтому необходимо замедлять

движение в i -том канале путем вычитания доли $K_{зам}x_j'(t)$. В случае, когда произведение $x_i'(t)x_j'(t)$ меньше нуля, то j -тый канал замедляет движение i -того канала и необходимо форсировать движение путем добавлением доли $K_{ускр}x_j'(t)$.

Тогда сформированная координата ошибки $\varepsilon_i(t)$ с учетом динамики остальных каналов описывается следующей функцией:

$$\bar{\varepsilon}_i(t) = [x_i^0(t) - x_i(t)] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_{ij}(x_i'(t), x_j'(t))$$

где $f_{ij}(x_i'(t), x_j'(t))$ – следующий логический закон формирования ошибки:

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

$K_{ускр}$ и $K_{зам}$ определяются как:

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

Функция нормализации $f_{norm}(x_{i0}(t))$ относительно изменения входной величины $x_{i0}(t)$:

$$f_{norm}(x_i^0(t)) = \begin{cases} x_i^0(t), & \text{если } x_i^0(t) = x_i^0(t-1) \\ |x_i^0(t) - x_i^0(t-1)|, & \text{иначе} \end{cases}$$

Рассмотрим логический закон блока анализа координаты ошибки. Данный блок анализирует переходный процесс в канале по значениям $\bar{\varepsilon}_i(t)$, производной выходной координаты $x_i'(t)$ и их произведению $\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t)$ и вырабатывает логически скорректированную координату ошибки $\varepsilon_i^*(t)$.

Когда координата ошибки и производная выходной координаты разнонаправлены, то есть их произведение $\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t)$ меньше нуля, тогда модуль координаты ошибки будет увеличиваться и необходимо замедлять движение в канале путем вычитания доли $K_{зам}x_j'(t)$. Если же произведение $\bar{\varepsilon}_i(t)x_i'(t)$ больше нуля и $|\bar{\varepsilon}_i(t)|$ больше $|x_i'(t)|$, то координата ошибка меняется медленно и необходимо форсировать движение в канале путем добавления доли $K_{ускр}x_j'(t)$.

Таким образом, логический закон управления блока анализа ошибки описывается следующей функцией:

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

$K_{ускр}$ и $K_{зам}$ определяются как:

$$K_{зам} = 1 + \left| \frac{\bar{\varepsilon}_i(t)}{f_{norm}(x_i^0(t))} \right|; \quad K_{ускр} = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_i(t)}{f_{norm}(x_i^0(t))} \right|$$

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

4. Примеры использования логического регулятора

Рассмотрим трехсвязную систему управления сложным динамическим объектом, описанную следующей матричной передаточной функцией:

$$W_{Oy}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.28s + 1} \times \begin{bmatrix} 0.25s^2 + 0.55s + 1 & -0.8 & -0.9(0.27s^2 + 0.47s + 1) \\ 0.75 & 0.25s^2 + 0.55s + 1 & 0.6(0.23s + 1) \\ 0.65(0.9s + 1) & 0.6(0.98s^2 + 0.8s + 1) & 0.25s^2 + 0.55s + 1 \end{bmatrix}.$$

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

$$W_{ПИ}(s) = \frac{0.45s + 0.44}{s(0.1s + 1)}.$$

Пример 1. Введем в каждый канал исследуемой системы чистое запаздывание:

$$W_{Oy}(s) = \frac{e^{-0.4}}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.28s + 1} \times \begin{bmatrix} 0.25s^2 + 0.55s + 1 & -0.8 & -0.9(0.27s^2 + 0.47s + 1) \\ 0.75 & 0.25s^2 + 0.55s + 1 & 0.6(0.23s + 1) \\ 0.65(0.9s + 1) & 0.6(0.98s^2 + 0.8s + 1) & 0.25s^2 + 0.55s + 1 \end{bmatrix}.$$

Графики переходных процессов в МСАУ без запаздывания, с запаздыванием, с запаздыванием и предложенным логическим регулятором при единичном ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 3.

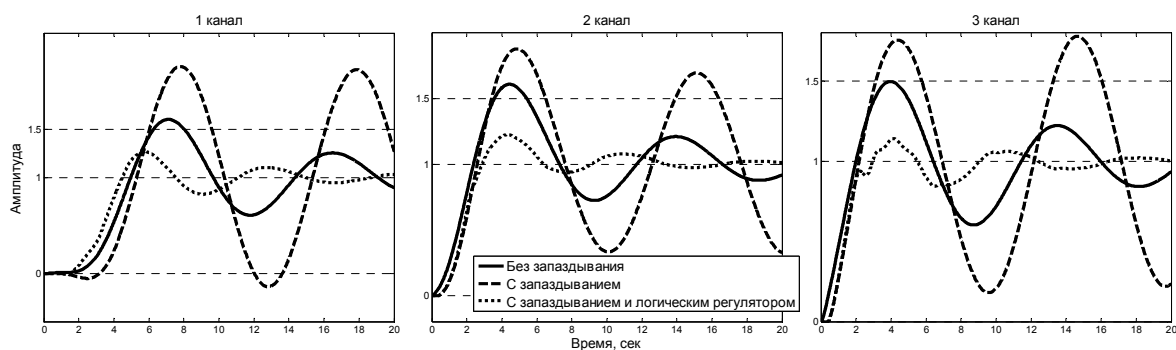


Рис. 3. Графики переходных процессов в системе без запаздывания (—), с запаздыванием (---), с запаздыванием и предложенным логическим регулятором (····).

Введение чистого запаздывания существенно ухудшило качество переходных процессов. Однако в системе с предложенным логическим регулятором даже при наличии запаздывания качество переходных процессов значительно лучше, чем в системе без запаздывания. Это объясняется тем, что логический регулятор вырабатывает опережающее решение, которое значительно уменьшает влияние чистого запаздывания в системе.

Пример 2. Рассмотрим исследуемую систему с чистым запаздыванием в прямой цепи каждого из каналов:

$$W_{ov}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.28s + 1} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} e^{-0.4}(0.25s^2 + 0.55s + 1) & -0.8 & -0.9(0.27s^2 + 0.47s + 1) \\ 0.75 & e^{-0.4}(0.25s^2 + 0.55s + 1) & 0.6(0.23s + 1) \\ 0.65(0.9s + 1) & 0.6(0.98s^2 + 0.8s + 1) & e^{-0.4}(0.25s^2 + 0.55s + 1) \end{bmatrix}$$

Графики переходных процессов в МСАУ без запаздывания, с запаздыванием, с запаздыванием и предложенным логическим регулятором при единичном ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 4.

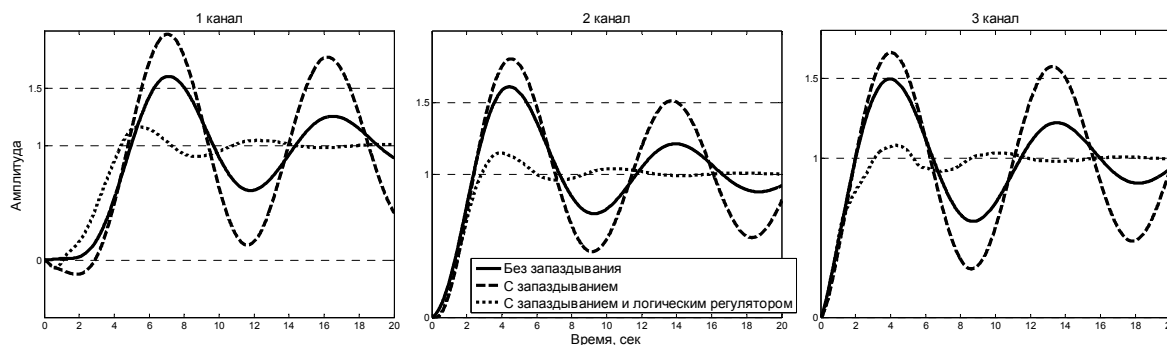


Рис. 4. Графики переходных процессов в системе без запаздывания (—), с запаздыванием (- -), с запаздыванием и предложенным логическим регулятором (····).

Качество функционирования системы с запаздыванием в прямой цепи ухудшилось во всех каналах – появилось значительное перерегулирование. Однако в системе с предложенным логическим регулятором, как и в примере 1, качество переходных процессов значительно лучше, чем в системах без запаздывания.

Пример 3. Исследуем систему с чистым запаздыванием в связях между каналами:

$$W_{ov}(s) = \frac{1}{0.77s^3 + 2.11s^2 + 2.28s + 1} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 0.25s^2 + 0.55s + 1 & -e^{-0.4} \cdot 0.8 & -e^{-0.4} \cdot 0.9(0.27s^2 + 0.47s + 1) \\ e^{-0.4} \cdot 0.75 & 0.25s^2 + 0.55s + 1 & e^{-0.4} \cdot 0.6(0.23s + 1) \\ e^{-0.4} \cdot 0.65(0.9s + 1) & e^{-0.4} \cdot 0.6(0.98s^2 + 0.8s + 1) & 0.25s^2 + 0.55s + 1 \end{bmatrix}$$

Графики переходных процессов в МСАУ без запаздывания, с запаздыванием, с запаздыванием и предложенным логическим регулятором при единичном ступенчатом входном сигнале представлены на рис. 5.

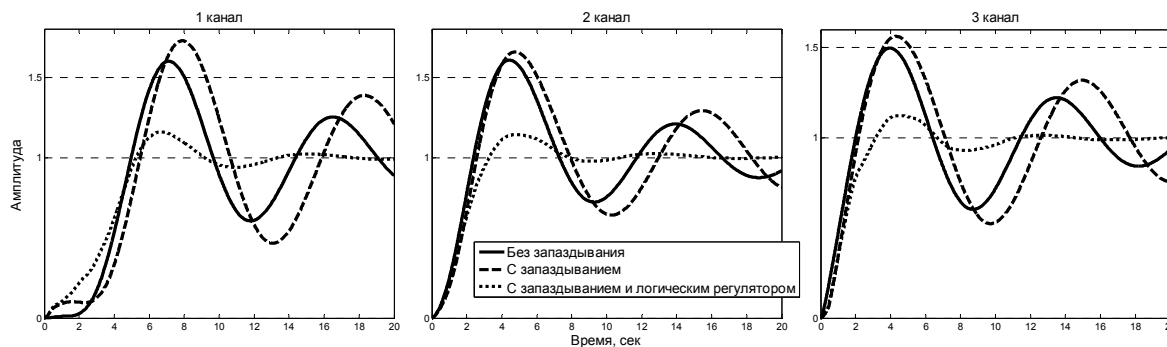


Рис. 5. Графики переходных процессов в системе без запаздывания (—), с запаздыванием (- -), с предложенным логическим регулятором и запаздыванием (····).

Видно, что качество переходных процессов в системе с логическими регуляторами в подсистемах значительно лучше по сравнению с остальными системами.

Таким образом, предложенный логический регулятор при введении чистого запаздывания не только сохраняет качество управления, но даже улучшает его по сравнению с системой без запаздывания.

5. Заключение

Предложена структура логической многосвязной системы управления динамическим объектом, содержащим чистое запаздывание в прямых и перекрестных каналах связи, в которой реализованы логические законы, согласно которым каждая подсистема принимает решение о стабилизации своей координаты на основе логического анализа как скорости движения собственного канала, так и скорости движения остальных координат системы.

Установлено, что предлагаемый логический закон управления обеспечивает требуемое качество управления даже при наличии чистого запаздывания в прямых и перекрестных каналах связи.

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

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

Список литературы

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.
3. Albertos P., Antonio S. Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, 2004.
4. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / Под ред. академика Васильева С.Н. М.: Машиностроение, 2008.
5. Филимонов А. Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2002. 288 с.
6. Баркин А.И. Устойчивость линейных систем с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2006. № 3. С. 3-7.
7. Wang Q.-G., Nie Z.-Y. PID Control for MIMO Processes // PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. London: Springer, 2012. P. 177-204.
8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.
9. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
10. Каяшев А. И., Полякова Л. Ю., Сазонова Т. В., Муравьева Е. А. Четкий логический регулятор температуры в автоклаве для производства газосиликатных шлакоблоков // Вестник УГАТУ: 2011. Т. 15, № 2 (42). С. 114-118.
11. Петунин В. И. Особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 1 (28). С. 11-17.
12. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967.
13. Старикова М.В. Исследование автоматических систем с логическими управляющими устройствами / Под ред. Петрова Б.Н. М.: Машиностроение, 1978.