



Российская Академия Наук

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

Труды
XXI Международной конференции
3-6 сентября 2019
Самара, Россия

Proceedings
of the XXI International Conference
September 3-6, 2019
Samara, Russia

ТОМ I

VOLUME I



Russia
Section
est. 1990



САМАРСКИЙ
ПОЛИТЕХ
Опорный университет



ИПУСС РАН

IEEE (Российская секция)

Самарский государственный
технический университет

Институт проблем управления
сложными системами
Российской академии наук

IEEE (Russian section)

Samara State
Technical University

Institute for the Control
of Complex Systems
of Russian Academy of Sciences

Труды XXI Международной конференции,
Том I
Proceedings of the XXI International Conference
Volume I

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

3-6 сентября 2019, Самара, Россия
September 3-6, 2019, Samara, Russia

Редакторы:

С.А. Никитов, Д.Е. Быков,
С.Ю. Боровик, Ю.Э. Плещивцева

Editors:

S.A. Nikitov, D.E. Bykov,
S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ОФОРТ
Самара 2019

УДК 519.7
ББК 32.817
П78



*Конференция получила финансовую поддержку
Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-20070)*

*The Conference received financial support
from Russian Foundation for Basic Research (project № 19-08-20070)*

Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Междуна-
П78 **родной конференции** (3-6 сентября 2019 г. Самара, Россия): в 2-х т. / Под ред.: **С.А. Никитова,**
Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. - Самара: ООО «Офорт», 2019.

ISBN 978-5-473-01246-0

T.I. - 556 с.

ISBN 978-5-473-01247-7

С 3 по 6 сентября 2019 года в г. Самаре состоялась XXI международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2019). Конференция была организована Институтом проблем управления сложными системами РАН (ИПУСС РАН) совместно с крупнейшим вузом Поволжского региона - Самарским государственным техническим университетом (СамГТУ) при содействии российской секции IEEE. В мероприятии приняли участие исследователи из ведущих университетов и научно-производственных организаций Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Италии, Испании, Китая, Латвии, Польши, Финляндии, Чехии, США, ЮАР. Российская Федерация была представлена учеными из Российской академии наук, научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и промышленных предприятий страны. На конференции обсуждался широкий спектр вопросов, связанных с передовыми достижениями науки и техники в области современной теории оптимального управления, электротехнологий и электронной техники, робототехники, новых информационных, коммуникационных и измерительных технологий, выработки и принятия решений при управлении в социально-экономических системах. Традиционно в фокусе внимания конференции были проблемы, связанные с разработкой моделей, методов и средств искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации процессов приобретения и компьютерного представления знаний, выработки и принятия решений, в том числе при управлении предприятиями, что формирует парадигму INDUSTRY 4.0. В первом томе сборника трудов ПУМСС-2019 представлены пленарные доклады, а также доклады участников конференции по направлениям: современные энергосберегающие электротехнологии; теория оптимального управления и ее приложения; моделирование и управление в технических системах.

The XXI International Scientific Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems" (CSCMP-2019) was held on September 3-6, 2019 in Samara (Russia). The Conference was organized jointly by the Institute for Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS) and the largest higher institution of the Volga Region – Samara State Technical University (SSTU) with assistance from the IEEE (Russian Section). The scientists from the leading universities and research and production organizations of Azerbaijan, Armenia, Belarus, Germany, Italy, Spain, China, Latvia, Poland, Finland, Czech Republic, USA and South Africa participated in the Conference. The Russian Federation was represented by the researches from Russian Academy of Sciences, research institutes, universities, research and production centres and enterprises. The Conference discussed a wide range of issues relevant to the advances in science and technology in the field of optimal control theory, electrotechnologies and electronics, robotics, intelligent systems and communication technologies, measuring techniques and diagnostics, decision-making in social-economic systems. One of the traditional areas of the Conference is the developing of Artificial Intelligence (AI) models, methods and tools for digitalization of knowledge and automation of the decision-making processes for business administration including the paradigm of INDUSTRY 4.0. The 1st volume of CSCMP-2019 Proceedings contains the plenary reports and the reports in the following areas: modern energy-saving electrotechnologies; optimal control theory and its applications; modelling and simulation in technical systems.

ISBN 978-5-473-01247-7 (I том)
ISBN 978-5-473-01246-0

УДК 519.7
ББК 32.817

© Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук, составление, оформление, 2019
© Оформление/ ООО «Офорт», 2019
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2019

48. Л.П. Мышляев, К.Г. Венгер, В.В. Грачев, А.В. Циряпкина Управление объектами с положительной обратной связью	392
49. В.И. Немченко, М.В. Посашков Системный анализ эффективности автоматического регулирования тепловой нагрузки жилых зданий в системах центрального теплоснабжения	396
50. А.В. Ненарокомов, Е.В. Чебаков, И.В. Крайнова, Д.Л. Ревизников, С.А. Будник Определение углового положения космического аппарата, основанное на решении обратных задач теплообмена	400
51. А.С. Нечаев, Ю.В. Мощенский Моделирование теплового потока в измерительной ячейке дифференциального сканирующего калориметра как объекта управления с распределенными параметрами	405
52. И.Н. Нечаева, А.С. Нечаев Способ оценки чувствительности пылевоздушной смеси к тепловому воздействию, вызванному электрическим разрядом	410
53. Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, Л.В. Швецова, Э.Д. Нурбосынов Имитационная модель электротехнического комплекса добывающей скважины с винтовой насосной установкой	415
54. Д.И. Пащенко, М.И. Гнутикова Сравнительный анализ использования LES и RANS подхода при численном 3D-моделировании горения метана	419
55. Г.М. Попов, Е.С. Горячкин, Ю.Д. Новикова, А.И. Корнеева Оценка влияния срывных явлений на характеристики вентилятора с помощью NLN метода	423
56. П.В. Просунцов, Е.А. Богачев, Е.Б. Елаков Моделирование термостабилизирующего отжига органоморфных преформ из окисленного полиакрилонитрила	429
57. В.Н. Пыстин, Д.Н. Шерстобитов, А.А. Миннигуллова Управление процессами обработки гетерогенных отходов	433
58. Ю.М. Рассадин Обеспечение инвариантности к ограниченным возмущениям в задаче управления перевернутым маятником	439
59. С.В. Резник, П.В. Просунцов, Д.Н. Бондалетов, О.В. Денисов, Л.В. Денисова, Н.М. Петров Отработка методики исследования теплопроводности анизотропных композитов	443
60. С.А. Решмин, Т.В. Глазков Нелинейная модель с переменной структурой для моделирования плоских колебаний ведущих колес транспортного средства	447
61. А.С. Римша, К.С. Римша Разработка средства моделирования угроз и оценки рисков автоматизированных систем газодобывающих предприятий	453
62. В.Р. Роганов, О.А. Кувшинова, Н. Есимова, Ю. Лавендел 3D системы, имитирующие визуально наблюдаемые объекты для тренировки глазомера человека	458
63. В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн, Н.С. Васильева Использование статистических моделей для совершенствования управления производственными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи	462
64. Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев Иерархическое кодирование при обработке сигналов аналитических приборов	467
65. О.А. Самарина, О.И. Кондратьев, А.Н. Сухонослова Система ликвидации шламонакопителей с использованием группы очистных сооружений крупного промышленного узла	471
66. Л.Н. Смирнова Математическое моделирование процесса нагрева системы приводов искусственных космических объектов	475
67. С.В. Солодуша, В.А. Спиряев, Э.А. Тацров Численное моделирование динамики участка энергоблока Назаровской ГРЭС полиномами Вольтерра	479
68. А.М. Сорокина, С.Н. Медведев, О.А. Медведева Задача нахождения маршрутов для совокупности агентов среди объектов двух типов	483
69. А.В. Стариков, В.Н. Овсянников, И.П. Колесников Комбинированное управление аппаратом воздушного охлаждения масла	490

Управление объектами с положительной обратной связью

Мышляев Л.П.
Сибирский государственный
индустриальный
университет
г. Новокузнецк, Россия
mail@nicsu.ru

Венгер К.Г.
ЗАО «Стройсервис»
г. Кемерово, Россия
k.venger@stroy servis.com

Грачев В.В.
Сибирский государственный
индустриальный
университет
г. Новокузнецк, Россия
vitaly.grachev@nicsu.ru

Циряпкина А.В.
Сибирский государственный
индустриальный
университет
г. Новокузнецк, Россия
asya1990_90@mail.ru

Abstract — The work is devoted to the study of control systems of objects with positive feedback (recycle). The classification of objects with different types of recycle was proposed: objects with recycling «by concentration», objects with recycling «by mass», objects with recycle «by parameters». The control algorithms of these types of objects with positive feedback were developed. The numerical studies of control systems of objects with positive feedback were conducted. Conclusions about the effectiveness of development were formulated.

Ключевые слова — положительная обратная связь (рецикл), объекты с положительной обратной связью, объекты с рециклом, численные исследования, система управления, алгоритм управления, координатное управление, параметрическое управление.

I. ВВЕДЕНИЕ

Управлению объектами с положительной обратной связью (рециклом) уделяется все больше внимания, так как именно такие объекты в большей мере удовлетворяют современным технологическим, экологическим и экономическим требованиям [1-5]. Основная часть работ по этой тематике посвящена только построению систем регулирования одним классом объектов с рециклом – рециклом «по концентрации» по терминологии У. Рея – без детального анализа их эффективности [6-9]. Указанный вид положительной обратной связи (ПОС) не охватывает другие виды рециклов современных промышленных и социально-экономических объектов. В настоящем сообщении предложена классификация объектов с различными типами рециклов, представлена обобщенная структура алгоритма управления и результаты численного анализа разработанных систем управления.

II. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (РЕЦИКЛОМ)

Математические модели объектов с рециклом в пространстве состояний в достаточно общем виде описываются выражениями [10]

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= A(t) \cdot X(t - \tau_x) + B(t) \cdot U(t - \tau_u) + C(t) \cdot W(t - \tau_w), \\ Y(t) &= D(t) \cdot X(t - \tau_y) + F(t) \cdot E(t - \tau_e),\end{aligned}$$

где X, U, W, Y, E – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей

измерений; $\tau_x, \tau_u, \tau_w, \tau_y, \tau_e$ – соответствующие времена запаздывания; $A(t), B(t), C(t), D(t), F(t)$ – матрицы соответствующих размерностей; t – непрерывное время.

Объекты с рециклом можно разделить на четыре типа.

1. Объекты с рециклом «по концентрации» [10], в которых в рецикле учитывается только концентрация (температура и т.д.) материала (рис. 1). В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$ и $D(t)=1$.

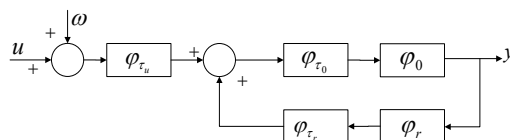


Рис. 1. Структура объекта с рециклом «по концентрации»

На рис. 1 обозначено w, u, y – возмущающее, выходное и входное воздействие; $\varphi_0, \varphi_r, \varphi_{\tau}$ – операторы возмущенного движения объекта без учета запаздывания, запаздывания и цепи рецикла; τ_0, τ_r, τ_u – время запаздывания в прямой цепи объекта, в цепи рецикла и в управлении.

2. Объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла (рис. 2). Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица $A(t)$ зависит от состояния $X(t)$ и $D(t) \neq 1$.

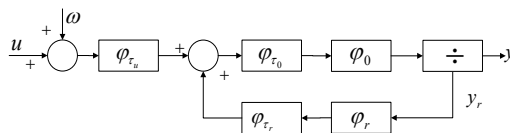


Рис. 2. Структура объекта с рециклом «по массе»

На рис. 2 блоком $\boxed{\div}$ обозначен делитель, а y_r – масса материала рецикла.

3. Объекты, в которых рецикл влияет на параметры отдельных их составляющих – рецикл «по

параметрам» (рис. 3). В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$.

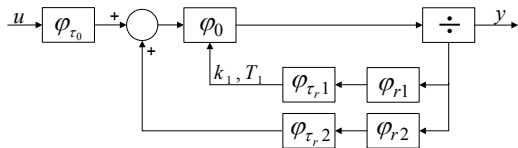


Рис. 3. Структура объекта с рециклом «по параметрам»

4. Комбинированные объекты с рециклом, объединяющие первые три класса (рис. 4).

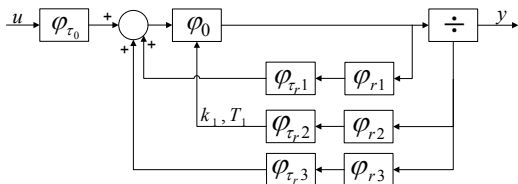


Рис. 4. Структура комбинированного объекта с рециклом

III. СТРУКТУРЫ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С РЕЦИКЛОМ

Для выделенных видов объектов с рециклом разработаны структуры алгоритмов управления с оценкой состояния рециклов, модельной компенсацией нежелательных свойств рециклов и введением контуров координатного и параметрического управления. Обобщенная структура системы управления представлена на рис. 5 [11].

На рисунке 5 приняты следующие обозначения: f_{R1}, f_{R2} – первый и второй регулирующий блок; f_{Σ} – блок экстраполяции; f_{Φ} – блок фильтрации; f_{II} – интегратор; $f_{Комп}$ – компаратор; $\boxed{\varepsilon}$ – блок расчета модуля ошибки регулирования; $\boxed{\div}$ – делитель потока; $\boxed{X}$ – блок умножения; $\alpha^*, k_1^*, T_1^*, k_{p1}^*, Q^*$ – базовые значения параметров системы; a_1, a_2, b_1, b_2 – задаваемые константы, рассчитываемые исходя из параметров конкретного технологического объекта.

Из данной обобщенной структуры получены структуры систем для объектов с различными видами рециклов.

IV. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С РЕЦИКЛОМ

Сравнительное оценивание эффективности систем управления проведено для всех видов рециклов с самовыравниванием и без самовыравнивания в прямой цепи объекта систем с модельной компенсацией цепи рецикла и системами с типовыми законами регулирования.

По результатам оценивания точности регулирования сделаны выводы.

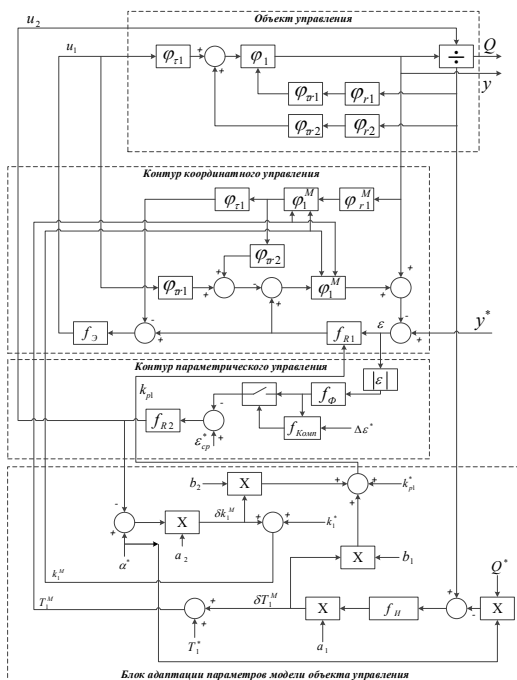


Рис. 5. Схема системы управления объектом с рециклом «по параметрам» с контурами координатного и параметрического управления

- 1) Для объектов с рециклом «по концентрации».
 - Система управления с модельной компенсацией цепи рецикла для объекта без самовыравнивания в прямой цепи устойчива при отношении $\frac{\tau_r}{\tau_0} > 1,7$, в то время как система управления с типовым законом регулирования неустойчива при всех отношениях $\frac{\tau_r}{\tau_0}$.
 - Для устойчивых систем во всем исследуемом диапазоне соотношений $\frac{\tau_r}{\tau_0}$ система управления с компенсацией контура рецикла превосходит по среднемодульному критерию систему управления с типовым законом регулирования не менее чем в 1,5 раза.
- 2) Для объектов с рециклом «по массе».
 - При «массе» рецикла больше 0,65 система управления объектом с рециклом «по массе» неустойчива.
 - Во всем устойчивом диапазоне при уменьшении «массы» рецикла, качество регулирования системы управления увеличивается.
 - Система управления с модельной компенсацией цепи рецикла и система управления с типовым законом регулирования для объектов с рециклом

«по массе» устойчивы при любых соотношениях $\frac{\tau_r}{\tau_0} \in [1; 45]$.

- Во всем исследуемом диапазоне соотношений $\frac{\tau_r}{\tau_0}$ система управления с компенсацией контура рецикла превосходит систему управления с типовым законом регулирования по среднемодульному критерию не менее чем на 40 %, а по времени переходного процесса – не менее чем в 3 раза.
- 3) Для объектов с рециклом «по параметрам».
- Анализ системы с рециклом «по параметрам» проведен для трех вариантов функционирования системы.

Вариант 1. При работе системы задействован только контур координатного управления. Контур параметрического управления выключен и положение делителя потока не меняется, т.е. $\alpha(t) = \alpha^* = const$. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, не корректируются.

Вариант 2. При работе системы задействованы как контур координатного управления, так и контур параметрического управления. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей

канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, не корректируются.

Вариант 3. При работе системы задействованы контуры координатного управления и параметрического управления. В блоке адаптации выполняется корректировка текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, в соответствии с изменениями $Q_r(t)$ под влиянием изменений $\alpha(t)$.

Получены среднемодульные ошибки для этих трех вариантов и для системы с типовым законом регулирования (таблица 1). Примеры переходных процессов представлены на рис. 6-7.

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление величины среднемодульной ошибки

Вариант структуры системы	Среднемодульная ошибка регулирования, отн.ед.	
	Внешнее воздействие по задающему входу	Внешнее воздействие по возмущающему входу
Вариант 1 (y_1)	5,04	5,94
Вариант 2 (y_2)	4,50	4,50
Вариант 3 (y_3)	4,06	4,07
Система управления с ПИ-регулятором	10,4	13,98

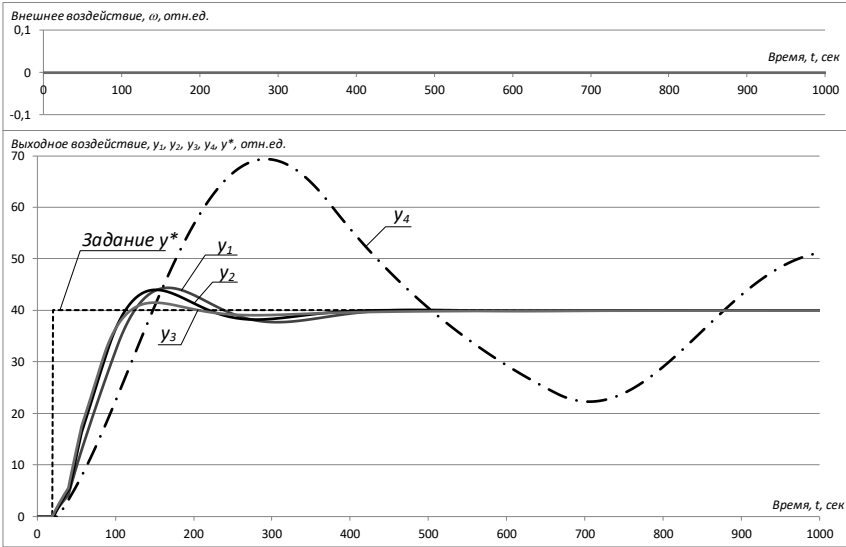


Рис. 6. Переходные процессы системы управления объектом с рециклом «по параметрам» при $y^* = 40$

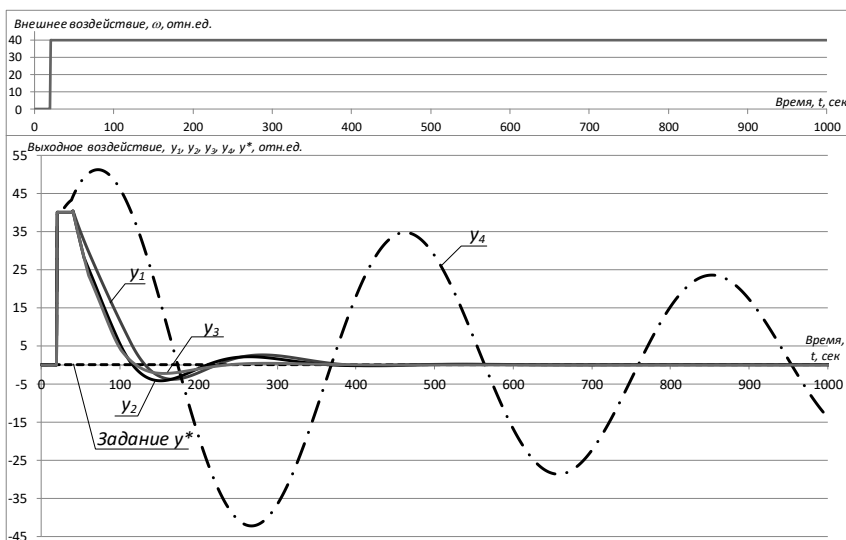


Рис. 7. Переходные процессы системы управления объектом с рециклом «по параметрам» при $w = 40$

- Точность регулирования разработанных систем по сравнению с системой с ПИ-законом регулирования выше не менее чем в 2 раза.
- Введение контура параметрического управления повышает точность регулирования не менее чем на 25 %, а введение адаптации коэффициентов модели – еще на 10 %.
- 4) Для всех систем управления с модельной компенсацией рециклов.
- При вариации коэффициентов модели k, T, τ_0, τ_r в пределах 20 % от номинальных значений точность регулирования ухудшается не более чем на 40 %.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют синтезировать структуры систем управления для объектов с различными видами рециклов, выбирать настроечные параметры алгоритмов управления и устанавливать требования к свойствам объектов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами / Э.В. Утеуш, З.В. Утеуш. - М.: Машиностроение, 1973. - 280 с.
- [2] Хайниш С.В. Об оптимальном управлении объектами с замкнутым циклом // Сб. «Управление сложными системами». - М.: ИАТ, 1974. - с.42-55.
- [3] Нагиев М.Ф. Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии / М.Ф. Нагиев. - М.: Наука, 1962. - 332 с.
- [4] Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием / Р.Т. Янушевский. - М.: Наука, 1978. - 416 с.
- [5] Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. - Новосибирск: Наука, 2006. - 483 с.
- [6] Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Построение регулятора для объекта с распределенными параметрами по передаточной функции замкнутой системы // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика, 2004. №2. - с.154-157.
- [7] Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Малютина В.С. Синтез модального регулятора для объекта с распределенными параметрами // Вестник ВГУ. Серия: системный анализ и информационные технологии, 2007. №1. - с.128-132.
- [8] Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong. A Smith predictor based PI-controller for active queue management / IEICE Transactions on communications. - Oxford University Press, 2005. Vol. E88-B, №11. - p.4293-4300.
- [9] Еремин Е.Л., Леянов Б.Н., Шеленок Е.А. Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник ТОГУ, 2010. №1(16). - с.45-54.
- [10] Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. - М.: Мир, 1983. - 368 с.
- [11] Евразийский патент № 021192. Система регулирования объекта с рециклом / Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г., Киселев С.Ф., Циряпкина А.В., Березин Д.Г., Чининдас М.Г., Барагичев К.Е. (RU); заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюд. обр. учреждение высш. проф. образования Сибир. госиндус. ун-т, ООО «Объединенная компания СИБШАХТОСТРОЙ».- № 201200846; заявл. 03.07.2012; опубл. 30.04.2015.

Научное издание

Труды XXI Международной конференции

**ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ
СИСТЕМАХ**

3-6 сентября 2019, Самара, Россия

Редакторы:

**С.А. Никитов, Д.Е. Быков,
С.Ю. Боровик, Ю.Э. Плешивцева**

Proceedings of the XXI International Conference

**COMPLEX SYSTEMS:
CONTROL AND MODELING PROBLEMS**

September 3-6, 2019, Samara, Russia

Editors:

**S.A. Nikitov, D.E. Bykov,
S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva**

Подписано в печать ____г.
Формат 70х100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объём 44,2 усл. печ. л. Тираж 300 экз. Заказ № ____.

Издательство ООО «Офорт».
443080, Самара, ул. Революционная, 70, лит. 3, оф. 405-02.
Тел.: 973-70-80, 973-70-55
e-mail: ofort-samara@mail.ru

Отпечатано в типографии ООО «Офорт».