

## Оптимизация управления структурно сложными системами

© Е.М. Воронов, А.А. Карпунин, А.В. Ванин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В работе рассматриваются некоторые типовые и перспективные структуры сложных систем управления и обсуждаются известные и разрабатываемые методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами (ММС) и иерархическими системами (ИС). Приводится схема оптимизации двухуровневой иерархической системы «управление-регулирование» на примере системы «наведение-стабилизация» летательного аппарата, а также результаты разработки алгоритма равновесно-арбитражной оптимизации ММС на примере трехканальной системы стабилизации летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** оптимизация управления, иерархическая система, структурно сложная система, стабилизация, навигация, регулирование, управление.

ММС — многообъектная многокритериальная система, состоящая из связанных между собой подсистем, каналов, коалиций, однородных по физической природе и/или равнозначных в функции (уровне) применения. В качестве примеров ММС можно привести многообъектную управляемую группу летательных аппаратов, роботов и т. д. или многоканальную систему стабилизации беспилотного летательного аппарата с перекрестными кинематическими связями.

На рис. 1 приведена упрощенная классификация структурно сложных систем (ССС) и подходы к оптимизации каждого их класса. При этом первые два класса — известные типичные структуры.

Второй класс сложности составляют многоуровневые системы с иерархией по слоям, стратам и эшелонам по Месаровичу [8], т. е. по сложности управления, по математическому описанию и по организационной иерархии. Например, по сложности управления это иерархия с уровнями (снизу вверх) регулирования, управления, принятия решения, адаптации, интеллектуализации и др.

На рис. 2 приведено разрабатываемое полииерархическое обобщение модели (облика) интеллектуальной системы управления (ИСУ) как внешней парадигмы управления в кибернетике, в которой реализуется высшая функция самоорганизации и оптимизации [6, 7]. Основой системы являются пять динамических связанных операторов в форме векторных компартов (ВК) (частного вида многоагентного описания) функциональных (например, механистических), информационных, энергетических, ресурсных и целевых динамиче-

ских процессов, которые отражают функциональные свойства высокосложных управляемых систем различной природы. Данные процессы порождают пять иерархических обликов: ОПУ — облик процессов управления, ИНО — информационный, ЭНО — энергетический, РЕСО — ресурсный и ЦЕЛО — целевой. На рис. 2 дан комментарий пяти обликов ИМПЕС, в том числе особенно важных четырех целевых уровней синтеза ЦЕЛО. Здесь также отмечено, что на высших уровнях ИМПЕС осуществляются перенастройка и коррекция каждого из пяти обликов и реализуются элементы интеллектуализации ИМПЕС на основе баз знаний, баз данных, логико-динамических баз динамических экспертных систем (ДЭС).



**Рис. 1.** Три вида структурной сложности и методы оптимизации управления

В настоящее время проработан частный вариант ИМПЕС в форме ромбовидной иерархической структуры (РИС) в комбинации ОПУ ИМПЕС и ИНО ИМПЕС. На рис. 3 дан общий вид РИС и физический структурный пример в виде иерархической распределенной системы управления ЛА (ИРСУ ЛА) с «верхним треугольником» оперативно-го управления и «нижним треугольником» информационного обеспечения оперативной иерархии.

Обобщенная структура ИМПЕС включает и обобщает известные результаты оптимизации управления ММС на основе стабильно-эффективных компромиссов (СТЭК), причем ММС является уровнем, например, РИС (рис. 3) или ИМПЕС (рис. 2) [7]. Развиваемый метод оптимизации управления РИС на основе межуровневой координации комбинирует алгоритмы получения облика РИС, межуровневых координаций и поуровневых СТЭК.

Иерархия управления целью - динамический синтез цели:

**Глобальная цель (ГЦ):** «потребности» (П) и «некомфортность» (НК) ИСУ

**Локальная цель (ЛЦ):** формирование мотивации на основе НК и вербальной программы действий на основе мотивации, информации и прогноза

**Частная цель 1 (ЧЦ1):** формирование количественных требований, задач, множества вариантов облика ИСУ

**Иерархия целей**  
**ЦЕЛО**

Целевая динамика на уровнях функционирования ИРСУ для достижения ЧЦ2

Влияние РЕСО на динамический синтез цели

**РЕСО**  
**Иерархия управления ресурсами**

**Иерархия оперативного управления**  
**ОПУ**

**Частная цель 2:** синтез (коррекция) оптимальной функциональной структуры (облик ИСУ) и сигнально-параметрическая «настройка» облика ИСУ

Функциональные слои иерархической распределенной ИРСУ (ИРСУ)

**Иерархия управления информацией**  
**ИНО**

ДЭС Парирование неопределенности на уровнях (робастные подходы на основе конфликтной анизотропии, нечеткие алгоритмы, адаптация)

Оптимизация информационных процессов обработки и передачи информации на уровне ИРСУ с учетом коррекции энергетической динамики и неопределенности информационных процессов

**ЭНО**  
**Иерархия управления энергией**

Рис. 2. Концептуальная полииерархическая модель иерархической многоагентной пента-структуры (ИМПЕС) облика ИСУ

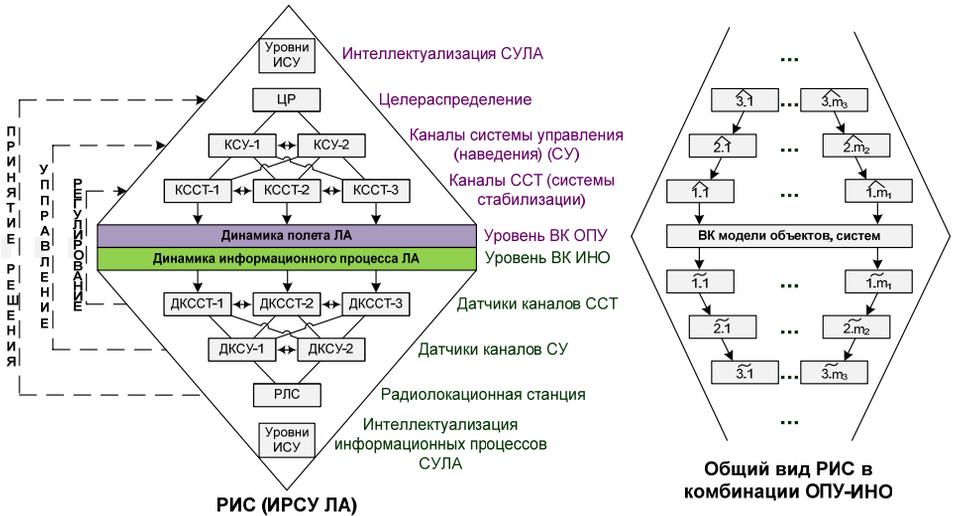


Рис. 3. Пример простейшего типичного варианта ИМПЕС-ромбовидной иерархической структуры ОПУ-ИНО (в сочетании иерархии по слоям и эшелонам)

Проблемные процессы формирования идеологии и технологии управления ИМПЕС показаны на рис. 4. Здесь компактно представлена взаимосвязь ноосферного знания, эффективного самосохранения (высшей функции обеспечения самосохранения на основе самоорганизации), кибернетики и ИСУ (высшей функции самоорганизации и оптимизации систем управления) и информатики (основного условия жизнеспособности систем). В соответствии с проблематикой по оптимальному управлению сложными системами на рисунке выделены пять направлений, которые анализируются в [6, 7]. Это концепция ИМПЕС (направление 1), представленная на рис. 2 и прокомментированная выше. Вторая проблема (направление 2) связана с формированием математического описания базы ИМПЕС в форме ВК.

Каждый ВК отражает динамические и сетевые свойства и удобен при представлении пяти сложных процессов и их взаимосвязей. В частном случае, без ограничения общности представлений, когда каждый компармент скалярный и в правой части системы кроме собственной динамики имеет место лишь динамика «притоков» и «оттоков» по сетевым связям, описание на пространстве компарментальных состояний принимает следующий вид [10]

$$\dot{x}_k = f_k(x) + \sum_{j=1, j \neq k}^5 y_{kj}(x) - \sum_{j=1, j \neq k}^5 y_{jk}(x) + y_{k0}(x) - y_{0k}(x) + w_k(u_k, x), \quad (1)$$

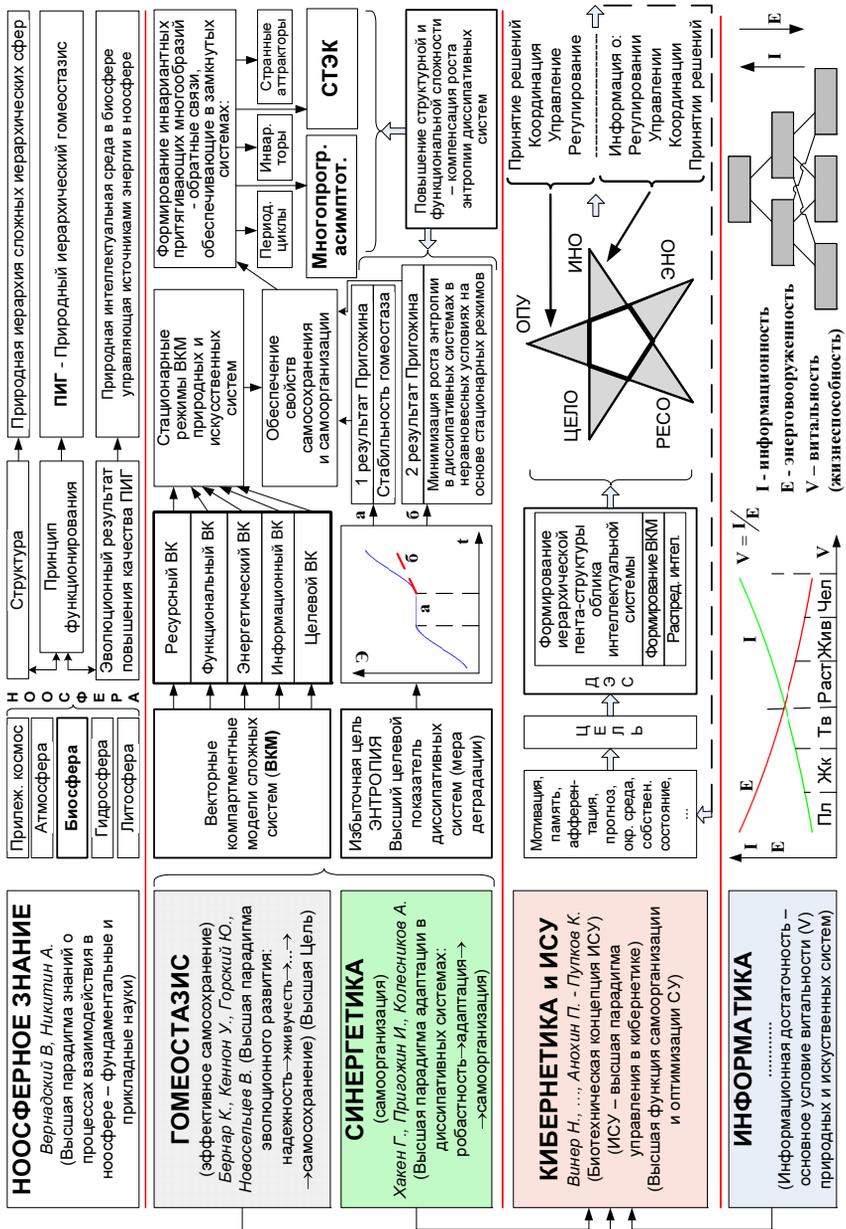
где  $k = 1, \dots, 5$ .

Если компармент  $x_k$  — векторный, то ему соответствует несколько переменных состояния  $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots)$ .

В (1)  $y_{jk}$  — «транспортный поток» связи из  $k$ -го в  $j$ -й компармент (индекс 0 — внешние связи системы компарментов).

Функции  $w_k(u, x)$ , характеризующие в данном частном случае (1) скорости протекания процессов, зависят от управления и состояния систем. Компарменты делятся на «рабочие» ( $w_k \neq 0$ ) и «накопительные» ( $w_k = 0$ ). Данное представление является простейшим удобным примером и может быть значительно усложнено. В настоящее время получение динамической системы ВК является сложной задачей, но равное значение каждого из пяти ВК в описании ИСУ требует разработки этой динамической системы.

В третьем направлении анализируется комплексный характер проблемы самоорганизации и управления в ИМПЕС. В задачах проектирования сложных систем необходимо отражать эволюционные динамические процессы самоорганизации и управления: динамика самоорганизации влияет на качество управления, а динамика управления — на процессы самоорганизации.



Обращение технологий ИСУ (например, в подсистемах 1, 2, 3)

Рис. 4. Процессы взаимодействия в сложных системах, которые сопровождают идеологию и технологию оптимизации управления ИМПЕС

Имеет смысл ввести понятия статики и динамики самоорганизации: В настоящее время в рамках проблемы самоорганизации развиваются направления структурного синтеза сложных систем на этапе проектирования, что и составляет статику самоорганизации.

В направлении статики самоорганизации (структурного синтеза) в рамках РИС в составе ОПУ и ИНО ИМПЕС исследованы два последовательных подхода структурного синтеза: получения множества обликов ОПУ на основе вербальной цели с промежуточным формированием элементов ЦЕЛО ИМПЕС и последующей многокритериальной оптимизацией облика РИС (ОПУ и ИНО) ИМПЕС на основе получения облика РИС в виде мультиграфа ярусно-параллельного типа и многокритериального выбора наилучшего варианта. Для формирования оптимального облика РИС рассматриваются такие критерии, как стоимость, грубость, эффективность, информационное качество, вычислительные затраты и др.

Как отмечено на рис. 4, формирование инвариантных «притягивающих многообразий» является принципиальным шагом в самоорганизации и управлении ИМПЕС при повышении структурной и функциональной сложности систем как способа компенсации роста энтропии деградации — высшего целевого показателя ИСУ [5, 9, 11].

В настоящее время достаточно полный набор инвариантных «притягивающих многообразий» сформирован в виде аттракторов-периодических циклов, инвариантных торов и странных аттракторов. Вопросы прикладного расширения класса «притягивающих многообразий» на уровнях регулирования, управления, принятия решений ИМПЕС на основе асимптотики многопрограммной стабилизации управления (направление 4) рассматривались в [3, 4, 11, 12, 15] и на основе поуровневых и иерархических [2, 14] стабильно-эффективных компромиссов (направление 5).

Основная идея СТЭК в поуровневых и иерархических системах как «притягивающих многообразий» состоит в активной балансировке структур ИМПЕС по эффективности, обладающей устойчивостью к отклонениям. Данный вид «притягивающих многообразий» обладает большой гибкостью и формируется на полном множестве степеней конфликтности — от максимальной степени до отсутствия конфликтности: антагонизм, бескоалиционная и коалиционная конфликтные ситуации и кооперативное взаимодействие.

Данный вид «притягивающих многообразий» имеет практическую ценность и охватывает классы структурно сложных задач ИМПЕС на стыке самоорганизации и управления в условиях исходной структурной неопределенности и конфликта в пяти рассмотренных иерархических структурах ИМПЕС.

Применение «притягивающих многообразий» на основе СТЭК составляет основу получения поуровневых оптимальных управлений многообъектных многокритериальных систем уровней и оптимального управления иерархической системой (на основе иерархического СТЭК).

Очевидна значимость применения СТЭК в задачах структурного синтеза (статики самоорганизации) и структурной коррекции в реальном времени.

Методика оптимизации формируется на основе комбинации методов проектирования иерархических распределенных систем для выбора оптимальной функциональной структуры ИМПЕС; методов оптимизации ММС на основе стабильно-эффективных игровых компромиссов для оптимизации и уравнивания подсистем в составе ММС-уровня регулирования, управления, принятия решения по эффективности или потерям [1]; методов оптимизации межуровневой координации с приоритетом — «правом первого хода» каждого верхнего уровня в ИМПЕС. Данная концепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ОПУ ИМПЕС.

Обобщенное оптимальное управление многоуровневой АСУ формируется на основе комбинации процессов:

- многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ);
- оптимизации в подсистемах ММС-уровней;
- уравнивания (балансировки) подсистем ММС-уровней;
- оптимизации межуровневой координации.

Очевидно, что данное обобщенное управление АСУ с учетом поуровневых и межуровневых связей требует разработки единой технологии его оптимизации.

В качестве комментария определения в практическом примере двухуровневой двухканальной СУ наведения-стабилизации ЛА (рис. 5) функциональный облик уже выбран. На соответствующих уровнях выбираются параметры  $k_{y,l}$ ,  $k_{kl}$ ,  $l = 1,2$ ,  $k_{дпу\ i}$ ,  $k_{дг\ i}$ ,  $i = 1,2$ , которые обеспечивают балансировку и Парето-оптимальность на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса. Сигналы  $u_{nl}$ ,  $l = 1,2$  обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а  $r_i$ ,  $i = 1,2$  — исполнительное управление.

В работе [1] представлен алгоритм оптимизации обобщенного управления многоуровневой АСУ на основе разработанного метода иерархического уравнивания по Штакельбергу, в котором обобщается известное понятие стратегии по Штакельбергу в классе иерархических дифференциальных игр (ИДИ) [2].

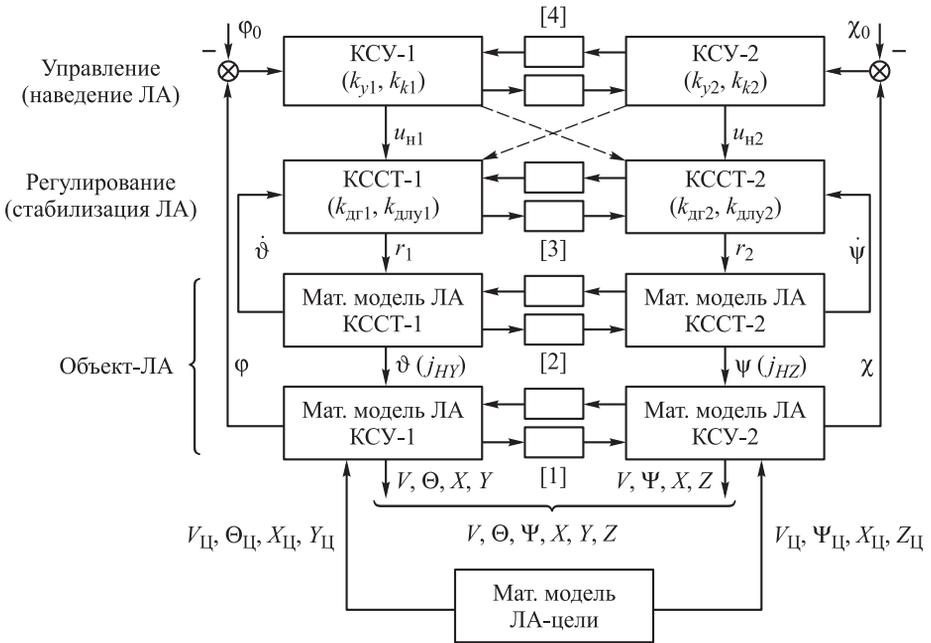


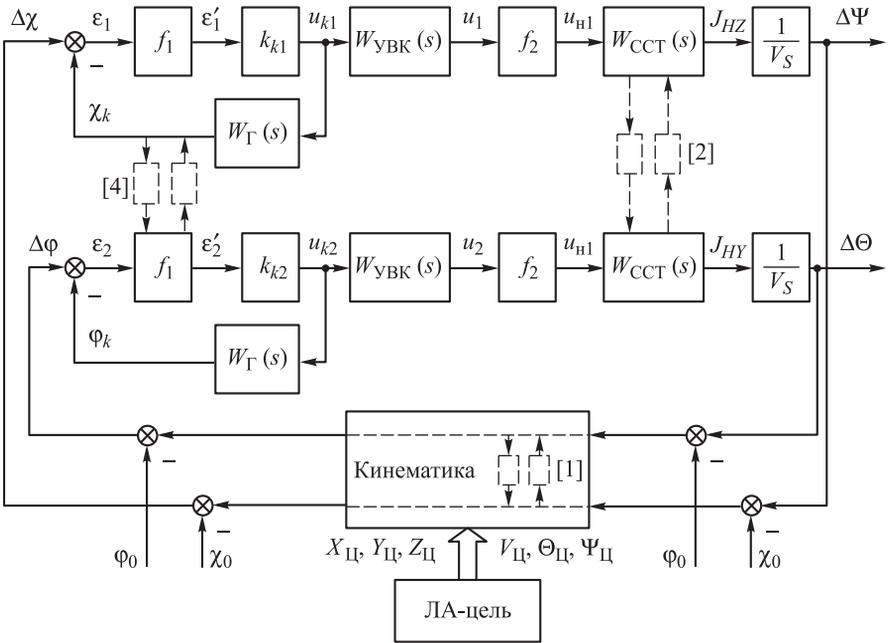
Рис. 5. Двухуровневая модель наведения-стабилизации двухканальной СУ ЛА

Система наведения-стабилизации ЛА с требованиями по точности, перегулированию, времени переходного процесса и устойчивости, предъявляемыми в виде векторного критерия, представляет собой типичную многообъектную многокритериальную систему в условиях исходной структурной несогласованности, в которой имеют место перекрестные связи между каналами.

Рассмотрим особенности проектирования многообъектных многокритериальных систем. В многоуровневой структуре сложной системы можно выделить три вида систем: система-объект, ММС и полная иерархическая система. Иными словами ММС — горизонтальный ряд в общем случае равнозначных объектов. В рамках ММС формируется класс задач оптимизации, в котором известные подходы оптимизации для обеспечения эффективности объекта (вариационные методы, принцип максимума, методы динамического и нелинейного программирования) существенно дополняются игровыми подходами с собственными принципами оптимизации для обеспечения уравновешенного (стабильного) взаимодействия, которое способствует достижению эффективности ММС в условиях естественной несогласованности. Методы решения в рамках данных принципов базируются на многообъектности структуры, многокритериальности задач и свойствах конфликтного взаимодействия объектов. Таким образом, в задачах многообъектной многокритериальной оптимизации

ции заложены фундаментальные понятия: стабильность, эффективность и стабильно-эффективный компромисс.

В перспективе предполагается дальнейшее решение данной задачи при условии структурных усложнений, введения третьего канала по углу крена. В этом случае система принимает вид, представленный на рис. 6. Результаты исследования данной системы представлены в [1]. Также предполагается в дальнейшем учесть факторы, которые в данной работе были не учтены или же приняты для упрощения постоянными в этой ситуации. Такими факторами, например, будет являться учет нелинейностей в каналах управления и стабилизации.



**Рис. 6.** Структурная схема двухканальной системы «наведение-стабилизация» беспилотного летательного аппарата

В заключение необходимо отметить, что значения параметров, рассчитанные с использованием элементов теории ММС, не только обеспечивают оптимальное управление в системе «стабилизации-наведения» с перекрестными связями, но и требуемое качество работы по статической точности, перерегулированию.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации-наведения летательного аппарата. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки.* Спец.вып. № 6. Моделирование и исследование физических и технических систем, 2012, с. 19–42.

- [2] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Иерархическое равновесие в многоуровневых системах управления. *Вестник РУДН. Инженерные исследования*, 2008, № 4, с. 18–29.
- [3] Воронов Е.М. Многокритериальный синтез позиционного управления на основе многопрограммной стабилизации. Ч. 1. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение*, 2012, № 2, с. 3–19.
- [4] Воронов Е.М. Многокритериальный синтез позиционного управления на основе многопрограммной стабилизации. Ч. 2. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение*, 2012, № 3, с. 3–11.
- [5] Колесников А.А. *Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза*. Москва, КомКнига, 2006, 240 с.
- [6] Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А., Пролетарский А.В. Концептуальная модель (облик) интеллектуальной системы управления (ИСУ) в форме иерархической многоагентной пента-структуры (ИМПЕС) и методы позиционной оптимизации и самоорганизации ИСУ на основе многоагентной стабилизации. *Инженерные системы-2013: Труды VI Международной научно-практической конференции*. Москва, РУДН, 2013, с. 3–5.
- [7] Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А., Пролетарский А.В. Концепция иерархической пента-структуры облика интеллектуальной системы управления (ИСУ) и принцип притягивающих многообразий в самоорганизации и оптимизации ИСУ. *Интеллектуальные системы: Труды Десятого международного симпозиума*. Москва, РУСАКИ, 2012, с. 23–34.
- [8] Месарович М., Мако Д, Такахара И. *Теория иерархических многоуровневых систем*. Москва, Мир, 1973, 344 с.
- [9] Николис Г., Пригожин И. *Познание сложного*. Москва, УРСС, 2003, 344 с.
- [10] Новосельцев В.Н. Анализ целей управления в технологических системах и системах естественных технологий. *Технологические системы и управление в организме: общие принципы и аналогии: Сб. тр. ИПУ РАН*, 1996, № 3, с. 6–14.
- [11] Колесников А.А., ред. *Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы*. Москва, КомКнига, 2006, 304 с.
- [12] Смирнов Н.В. Задачи многопрограммного управления и стабилизации в различных классах динамических систем. *Тр. Средневолжского мат. общ.*, 2005, т. 7, № 1, с. 192–201.
- [13] Смирнов Н.В., Соловьева И.В. Применение метода позиционной оптимизации для многопрограммной стабилизации. *Вестник С.-Петербург. унта. Серия 10. Прикладная математика, информатика, процессы управления*, 2009, вып. 3, с. 253–261.
- [14] Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А., Пролетарский А.В., Ванин А.В. Структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления. *Интеллектуальные системы: Труды Десятого международного симпозиума*. Москва, РУСАКИ, 2010, с. 33–38.
- [15] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Фролов С.В., Чжан Сяньцзянь. Субоптимальное равновесное позиционное управление многообъектной системой на основе многопрограммной стабилизации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение*, 2012, № 4, с. 3–17.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Воронов Е.М., Карпунин А.А., Ванин А.В. Оптимизация управления структурно сложными системами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1080.html>

**Воронов Евгений Михайлович** родился в 1940 г., с отличием окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1963 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления». Автор более 180 печатных работ в области теории оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов, управления иерархическими системами. e-mail: [emvoronov@mail.ru](mailto:emvoronov@mail.ru)

**Карпунин Александр Александрович** родился в 1980 г., с отличием окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления». Автор более 70 печатных работ в области теории оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами, иерархическими системами и задач управления летательными аппаратами. e-mail: [ksans@yandex.ru](mailto:ksans@yandex.ru)

**Ванин Александр Викторович** родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирант кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-программист ФГУП ЦНИИ «Комета». Автор пяти печатных работ в области наведения летательных аппаратов, управления в иерархических системах. e-mail: [mole@list.ru](mailto:mole@list.ru)