

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

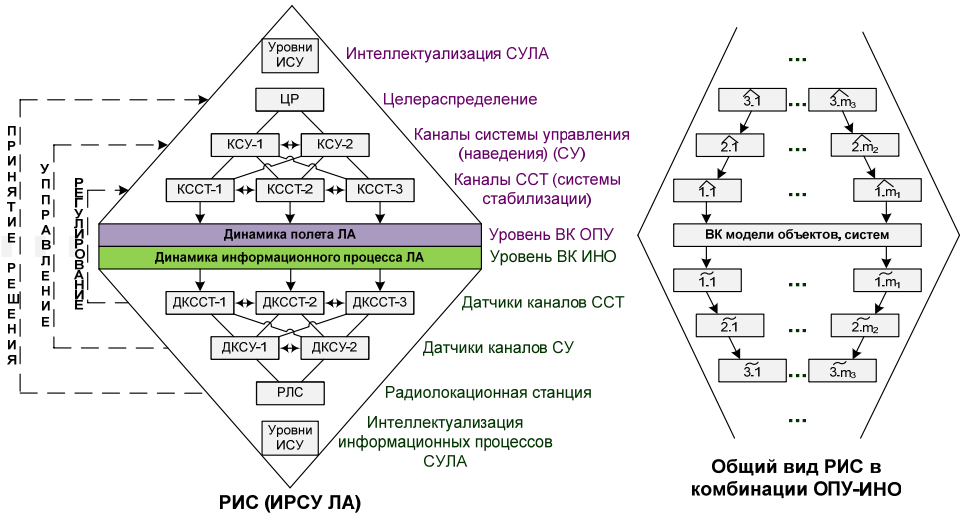


Рис. 3. Пример простейшего типичного варианта ИМПЕС-ромбовидной иерархической структуры ОПУ-ИНО (в сочетании иерархии по слоям и эшелонам)

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 компартимент скалярный и в правой части системы кроме собственной динамики имеет место лишь динамика «притоков» и «оттоков» по сетевым связям, описание на пространстве компартиментальных состояний принимает следующий вид [10]

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

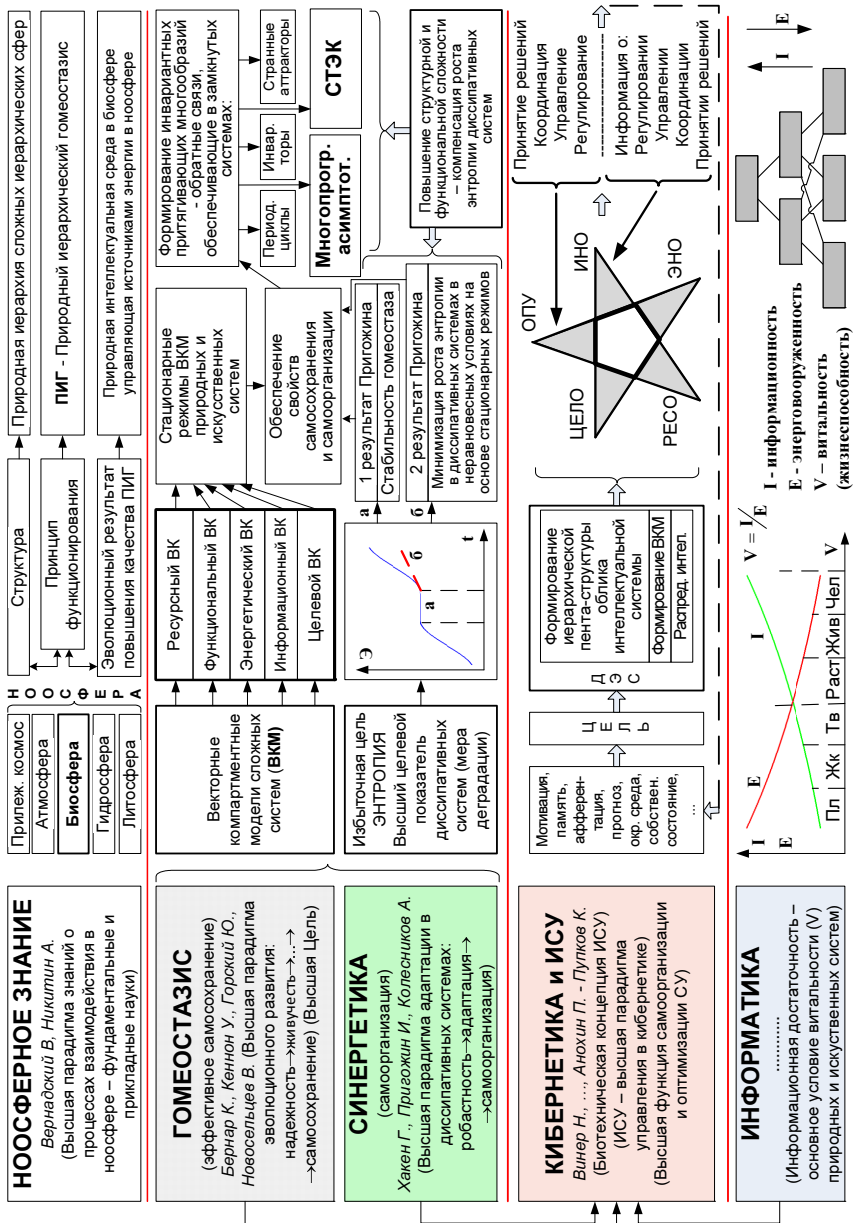
где $k = 1, \dots, 5$.

Если компартимент 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 компартимент (индекс 0 — внешние связи системы компартиментов).

Функции $w_k(u, x)$, характеризующие в данном частном случае (1) скорости протекания процессов, зависят от управления и состояния систем. Компартименты 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_{yl} , 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].

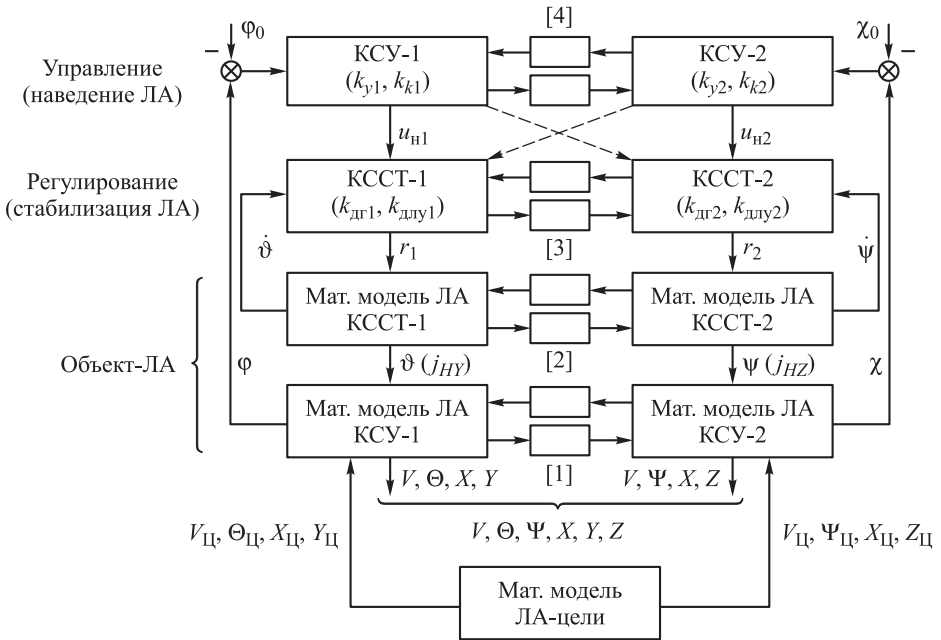


Рис. 5. Двухуровневая модель наведения-стабилизации двухканальной СУ ЛА

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.

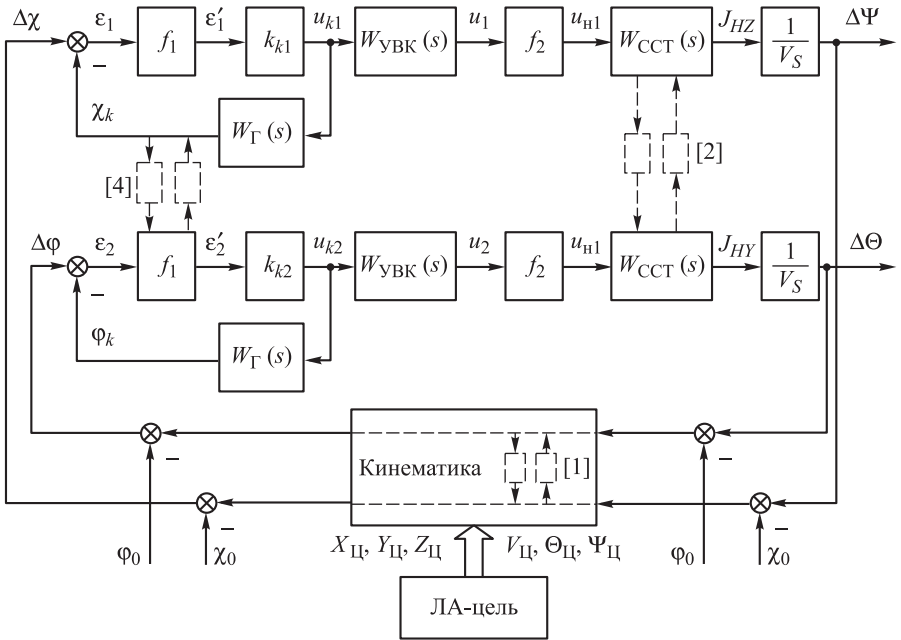


Рис. 6. Структурная схема двухканальной системы «наведение-стабилизация» беспилотного летательного аппарата

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

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

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