

## Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-138-149

**О.В. Кофнов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, П.М. Трефилов**

### **СПЕЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

*Рассматривается проактивное управление групповым поведением робототехнических средств на основе поведенческих моделей, где интеллект формируется как результат поведения множества физических сущностей. Исследуемый комплекс представляет собой множество распределенных агентов, функционирующих в реальном масштабе времени в среде с возмущающими воздействиями. Для рассматриваемого сетевого объекта используется модель взаимодействия Дж. Бойда, описывающая цикл работы системы управления этого объекта. Исходными данными для решения поставленной задачи управления являются горизонт планирования, сценарий действия группы, множество агентов с сопоставленным им набором элементарных действий, множество предметно ориентированных ограничений на использование сценария и показатель качества решения задачи управления. Требуется осуществить распределение агентов в пространстве и во времени на множестве действий сценария с учетом всех возможных ограничений. Разработанная технология позволяет опережать возможные сценарии реализации возмущающих воздействий. Используется методология комплексного предсказательного моделирования процессов проактивного управления и координации поведения самоорганизующейся группы роботов, где в качестве базовых моделей используются новые логико-динамические модели. Одним из основных достоинств разработанных комбинированных моделей, методов, алгоритмов и программ является обеспечение на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректного согласования аналитико-имитационных моделей управления структурной динамикой сложных динамических объектов с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационно-технологий. Также разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования, проактивного мониторинга и управления указанными объектами, так и задач диалогового взаимодействия, планирования вычислений, обработки данных и знаний. Основное отличие и достоинство предложенного подхода состоит в том, что задачи моделирования, планирования и управления конфигурацией и реконфигурацией робототехнических средств решаются не изолировано, а интегрировано в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой.*

*Робототехнические средства; проактивное управление; цикл Бойда; групповое поведение; логико-динамическая модель; Behavior-Based Systems.*

**O.V. Kofnov, S.A. Potriasaev, B.V. Sokolov, P.M. Trefilov**

### **SPECIAL MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR PROACTIVE GROUP BEHAVIOR CONTROL OF ROBOTS**

*The paper describes the proactive control of robots group behavior using Behavior-Based System models, where the intellect is formed by a physical entities behavior. The observed complex is an array of distributed agents functioning in real time under disturbances. John Boyd's OODA loop model is used to describe the control system work cycle of such network object. The input data of the control task are a planning horizon, a group action scenario, an array of agents and their possible elementary operations, a set of scenarios using restrictions and a quality indicator of the control*

*problem solution. The output data is the distribution plan of agents in space and time to realize the scenario under restrictions. The developed technology predicts the environmental disturbances. The complex predictive modeling methodology for a self-organized robots group control is used with logical-dynamic models. One of the key advantages of developed combined models, methods, algorithms and software is the possibility to coordinate analytical and simulation control models of complex dynamic objects and their logical-algebraic analogs and models based on intelligent information technology. This coordination is on the conceptual, model-algorithmic, information and software detailing levels. The special language for modeling, planning, proactive monitoring and control task description is also developed. This language can be used for dialog interaction, calculation planning and data mining too. The proposed method main advantage is the non-isolated, but integrated solving of robotics configuration (reconfiguration) modeling, planning and management with the structural dynamics proactive control common problem solution.*

*Robots; proactive control; OODA loop; group behavior; logical-dynamic model; Behavior-Based Systems.*

**Введение.** В основу созданного комплекса моделей, алгоритмов и прототипа программного обеспечения проактивного управления групповым поведением робототехнических средств (РТС) положены идеи и концепции, разработанные при создании и использовании систем, получивших, в свое время название систем, основанных на поведении (англ. Behavior-Based Systems, BBS) [1]. Соответствующие модели называются иногда для краткости поведенческими моделями. В указанных системах интеллект формируется как результат индивидуального поведения множества физических сущностей (в нашем случае РТС) и/или виртуальных сущностей (например, программных агентов в динамической среде) и их взаимодействия.

В работе [1], в связи с этим указывалось: «В отличие от своих предшественников (интеллектуальных агентов без модели рассуждений – агентов с реактивной структурой) BBS-системы, во-первых, рассматривают не отдельные шаги поведения в виде реакции на входную информацию, а паттерны поведения (многошаговые действия) и, во-вторых, они при формализации с помощью модели конечного автомата используют внутреннее состояние для учета предыстории. Поэтому при формировании стратегии поведения они обладают способностью планировать, обучаться и рассуждать». При этом главной особенностью исследуемых комплекса РТС является то, что они представляют сеть распределенных агентов (каждого отдельного РТС), функционирующих в реальном масштабе времени в среде с возмущающими воздействиями (в возмущающей среде).

Для рассматриваемого сетевого объекта все управленческие процессы привязаны к реальному времени и временные аспекты работы системы имеют решающее значение. В этой связи было предложено для указанных ситуаций использовать модель взаимодействия систем, предложенную Дж. Бойдом (J. Boyd) [1], в которой взаимодействующие системы имеют стандартный замкнутый цикл функционирования, состоящий из четырех фаз, а именно наблюдение, ориентация, решение, действие. Следует отметить, что данная технология была уже предложена ранее в 1984 г в работах наших отечественных ученых [2–5] применительно к проблематике управления гибкими автоматизированными производствами. На рисунке 1 эти фазы названы восприятие, оценка и прогноз ситуации, принятие решения, реализация решения (действий), соответственно. Из анализа рис. 1 следует, что каждый объект (в нашем случае РТС) должен иметь свою модель и средства отслеживания действий других РТС, которые позволяют им прогнозировать фазы цикла Бойда для каждого из РТС, выполнять прогнозирование своего поведения и поведения других РТС, оценивать ситуацию с позиций достижимости собственных целей в контексте построенного прогноза (в рамках собственного цикла Бойда) и далее вырабатывать (корректировать) собственное решение и исполнять его. Описанный цикл работы системы управления сетевого объекта задаёт схему (мета модель) управления в реальном времени.

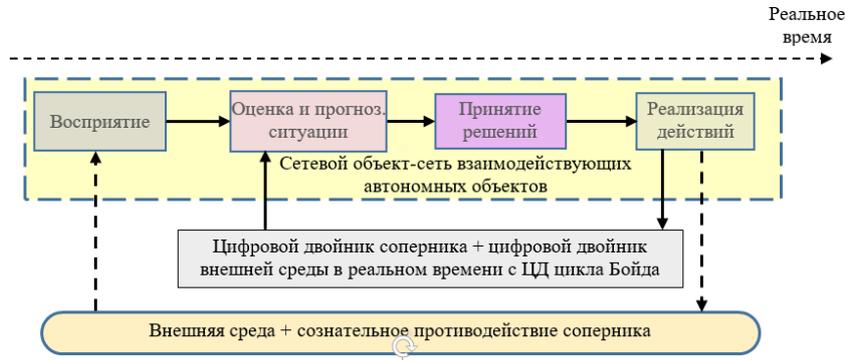


Рис. 1. Цикл Бойда в системе управления реального времени с цифровым двойником внешней среды

**Постановка задачи.** Следуя работе [1], содержательную постановку координации поведения группы РТС можно описать следующим образом.

Дано:

1) Горизонт планирования  $[T_0, T_k]$ , где  $T_0$  и  $T_k$  – (календарное) время начала и окончания исполнения группового сценария поведения, причём значение  $T_k$  может задавать самое позднее допустимое время окончания выполнения сценария групповой работы РТС или в постановке задачи данное время может быть не задано.

2) Сценарий действий группы РТС, т.е. частично-упорядоченное множество действий  $X$ , которое должно быть выполнено на заданном временном горизонте для достижения поставленной цели. Сами возможные сценарии поведения группы РТС, задаются с помощью соответствующих динамических смешанных ограничений в рамках разработанных логико-динамических моделей (рис. 2).

3) Множество РТС, каждому из которых поставлен в соответствие список элементарных действий сценария (элементарные (неделимые) операции), которые он способен выполнять и интервалы времени доступности объекта.

4) Множество специфических предметно ориентированных ограничений на использование РТС на множестве действий сценария (например, по техническому состоянию, по погодным условиям и т.п.).

5) Показатель качества решения задачи планирования (коррекции плана, перепланирования)  $F(P(X, D([T_0, T_k])))$ , где  $P(X, D([T_0, T_k]))$  – скоординированное в пространстве и во времени распределение множества РТС  $D([T_0, T_k]) = \{D_j([T_0, T_k])\}_{j=1}^M$  на горизонте планирования  $[T_0, T_k]$  по множеству действий  $X = \{X_i\}_{i=1}^N$  сценария.

Требуется осуществить распределение  $P(X, D([T_0, T_k]))$  РТС в пространстве и во времени на множестве действий сценария, с учётом всех наложенных динамических ограничений, которое оптимизирует показатель качества управления  $F$ , связанных с сервисным обслуживанием судов гражданского авиации.

Данное распределение должно поддерживаться на программном уровне как на этапе планирования, так и на этапе оперативного управления (коррекции ранее составленных планов, перепланирования). На последней фазе цикла Бойда принятое решение (план) исполняется. Эта компонента задачи группового поведения РТС в значительной части является предметно зависимой и исполняется в реальном времени на основе разработанного специального модельно-алгоритмического и программного обеспечения.

При этом за счет предложенной ранее технологии проактивного управления РТС исполнение запланированных действий каждым РТС на каждой фазе должно по возможности опережать возможные реализации сценариев возмущающих воз-

действий [6–9]. Данное опережение базируется на разработанных к настоящему времени моделях, методах и алгоритмах комплексного предсказательного моделирования развивающейся ситуации, описывающей структурную динамику объектов в различных предметных областях [10–17].

Следуя работам [1–5] принятие решений в цикле Бойда для сетевого объекта рассматриваемого класса (группировки РТС) в начальный момент времени состоит, во-первых, в решении задачи формирования сценария достижения цели и, во-вторых, в решении задачи динамического распределения операций, входящих в сценарий на множестве РТС. Формально эти задачи хорошо известны из литературы как компоненты задачи планирования действий, и для её решения предложено достаточно много подходов, моделей и алгоритмов. Алгоритм опережающего планирования в реальном времени в контексте цикла Бойда предложен, например, в [1–5].

В отличие от работ [2–5], где в качестве формального аппарата описания и решения перечисленных выше задач предлагалось использовать атрибутивную формальную грамматику либо модели и алгоритмы, в основе которых лежит поиск на графах типа «и – или», в рамках разработанного нами подхода используется методология и технологии комплексного предсказательного моделирования процессов проактивного (упреждающего) управления и координации поведения самоорганизующейся группы РТС, где в качестве базовых моделей используются новые логико-динамические модели, представленные на рис. 2 [6, 7, 18–21]. На данном рисунке приняты следующие обозначения

$M_g$  – логико-динамические модели управления движением РТС (пространственные ограничения);

$M_k$  – логико-динамические модели управления каналами РТС;

$M_o$  – логико-динамические модели управления операциями сервисного обслуживания судов гражданской авиации с использованием РТС;

$M_n$  – логико-динамические модели управления потоками (материальными, энергетическими, информационными) в РТС;

$M_p$  – логико-динамические модели управления ресурсами РТС;

$M_c$  – логико-динамические модели управления параметрами операций;

$M_s$  – логико-динамические модели управления структурной динамикой как РТС, так и группы (комплекса) РТС;

$M_n$  – логико-динамические модели управления вспомогательными операциями.

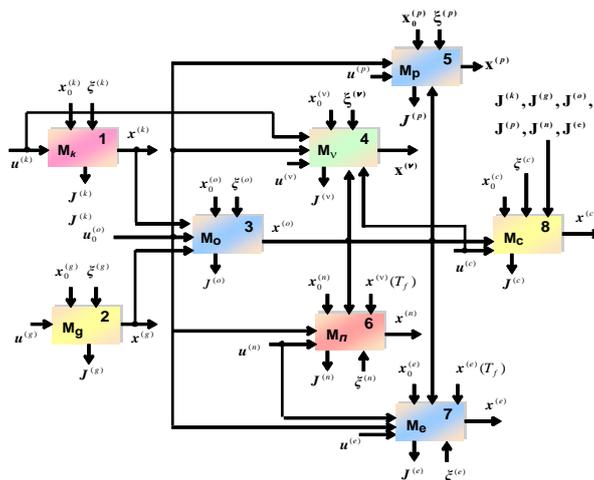


Рис. 2. Обобщенная структура полимодельного комплекса, описывающего функционирование РТС

Одно из основных достоинств разработанных комбинированных моделей, методов, алгоритмов и программ состоит в том, что они обеспечивают на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование (в соответствии с критериями гомоморфизма отношений) математических (аналитико-имитационных) моделей управления структурной динамикой сложных динамических объектов (в нашем случае РТС) с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей РТС, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать задачи оперативного структурно-функционального синтеза как облика РТС и систем управления (СУ) ими, так и соответствующих интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) мониторинга, прогнозирования и управления, а также синтеза сценариев их поведения. Для этого разработаны соответствующие комбинированные методы и алгоритмы, являющиеся новыми модификациями метода локальных сечений Болтянского В.Г., метода ветвей и границ, метода преобразований, метода основных осей Брента [22]. Другое достоинство предложенного варианта формализации управляемой структурной динамики РТС состоит в том, что на его основе разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования (коррекции планов, перепланирования), проактивного мониторинга и управления указанными объектами, так и задач диалогового взаимодействия, планирования вычислений, обработки данных и знаний. На программном уровне реализации данный язык базируется на нотации BPMN (Business Process Modelling Notation) и языке BPEL (Business Process Execution Language) [23]. И, наконец, самое главное, предлагаемый новый математический аппарат управляемой структурной динамики РТС позволяет на данных объектах реализовать процессы целенаправленного выбора ими своей внутренней организации, что является проявлением основного свойства самоорганизующихся сложных технических объектов (СТО).

На рис. 3 и 4 представлены соответственно обобщенная и детальная структура разработанного программного комплекса проактивного управления групповым поведением комплекса РТС для организации процессов приема, передачи, обработки и хранения информации о состоянии объектов наблюдения при дистанционном зондировании заданного района Земли. В данном случае в качестве комплекса РТС рассматривалась группировка маломассоразмерных космических аппаратов (МКА) [21].

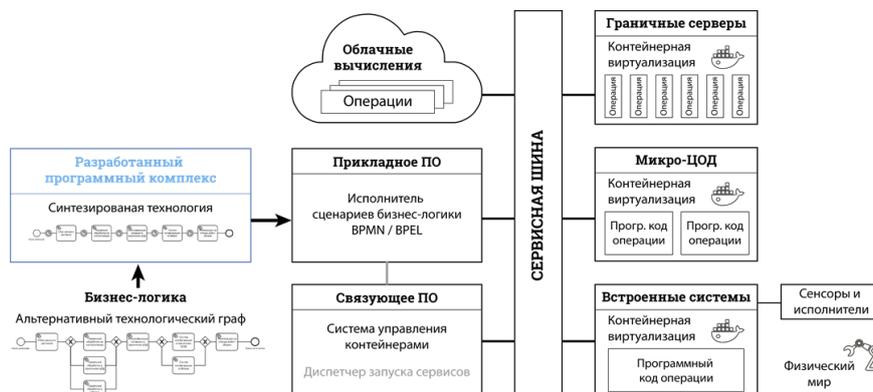


Рис. 3. Место разработанного программного комплекса в общей структуре модифицированной информационно-аналитической платформы

**Пример решения задачи.** Заданы технологические, топологические и функциональные структуры бортового комплекса управления (БКУ) и НКУ МКА ДЗЗ (для краткости дальнейшего изложения будем писать АСУ МКА), а также соответствующие пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с решением задач управления МКА ДЗЗ. На рис. 5 представлен пример графического задания технологии (функциональной структуры) сбора, обработки информации и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ. Каждому блоку на рисунке соответствует своя функция обработки информации и управления, а также соответствующий программный модуль.



Рис. 4. Структура разработанного программного комплекса проактивного управления групповым поведением комплекса РТС

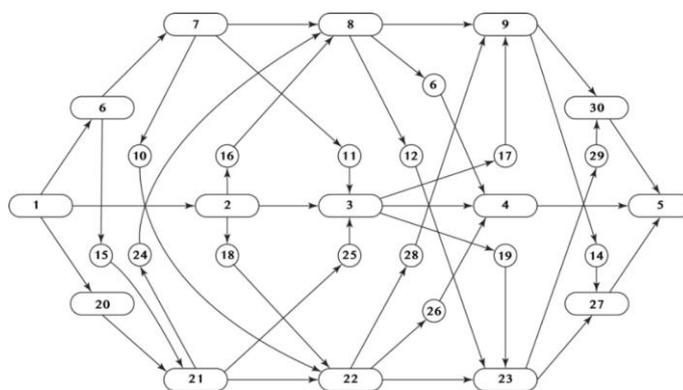


Рис. 5. Графическое описание обобщенной технологии решения задач сбора, обработки данных и формировании управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ

Применительно к перспективным системам сбора и обработки информации, создаваемым в настоящее время в отечественной космической отрасли на базе киберфизических систем (КФС) и облачных сервисов содержание перечисленных блоков представлено на рис. 6.

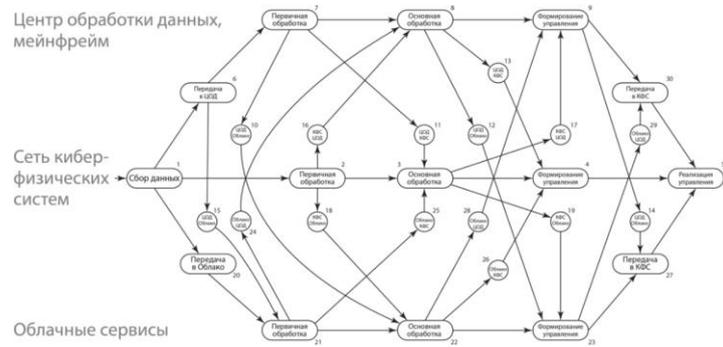


Рис. 6. Перечень и взаимосвязь выполняемых в АСУ МКА ДЗЗ функций обработки информации и управления, а также программных модулей, их реализующих на основе концепции КФС

Требуется найти наилучший вариант распределения функций обработки получаемых данных и управления, а также соответствующих программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ. В данном случае мы рассматриваем не какие-то фиксированные варианты распределения данных функций, а все возможное множество указанных вариантов, предусмотренных в документации Главного конструктора МКА ДЗЗ. Другими словами, в данном случае должна быть решена, во-первых, задача многокритериального структурно-функционального синтеза технологии обработки получаемых данных и управления основными элементами и подсистемами АСУ МКА ДЗЗ, и, во-вторых, должен быть построен конкретный план работы бортовых систем МКА и средств НКУ МКА, реализующий данную технологию. В работах авторов данной статьи показано [6–9, 18–23] как с помощью разработанного полимодельного комплекса и комбинированных методов оптимизации удалось свести перечисленные прикладные задачи к задаче оптимального программного управления сложным динамическим объектом (АСУ МКА ДЗЗ), а ее, в свою очередь, к двухточечной краевой задаче.

На рис. 7–10 в графическом виде представлены (эвристические) и оптимальные планы распределения функций управления (программных модулей) для рассматриваемых сценариев изменения внешней обстановки. Из анализа результатов машинных экспериментов следует, что за счет оптимизации могут быть улучшены значения соответствующих показателей на 25–30 %.

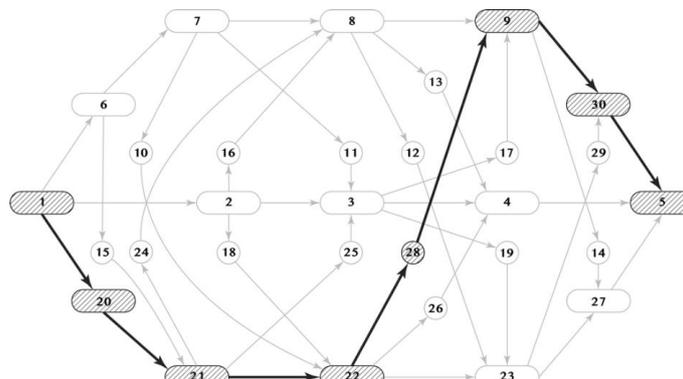


Рис. 7. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (эвристический план)

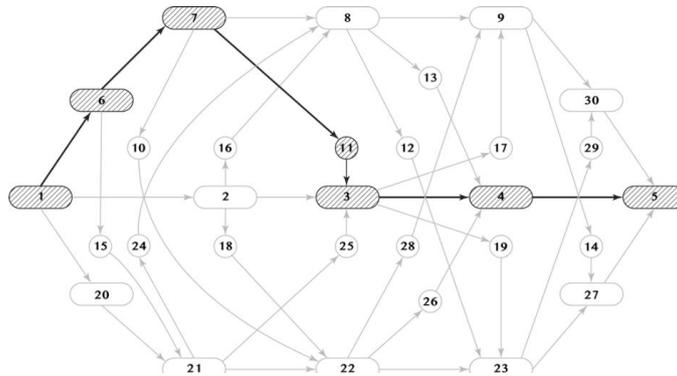


Рис. 8. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (оптимальный план)

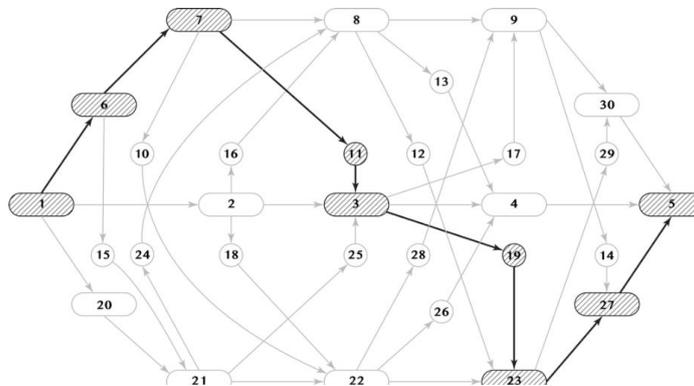


Рис. 9. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию (эвристический план)

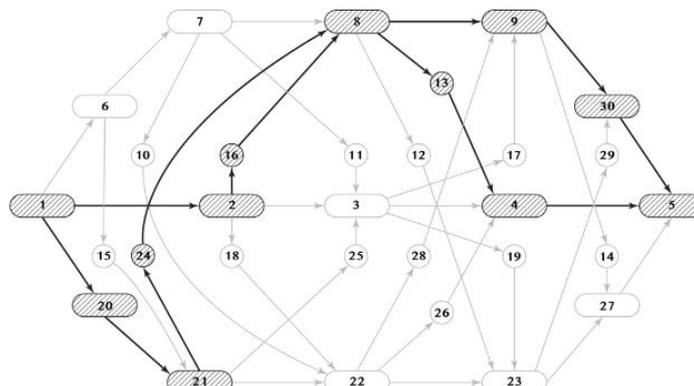


Рис. 10. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию (оптимальный план)

**Заключение.** Основное отличие и достоинство предложенного подхода к оптимальному синтезу технологии и программ проактивного управления каждым РТС состоит в том, что задачи моделирования, планирования и управления конфигурацией и реконфигурацией РТС для повышения эффективности и устойчивости

функционирования в целом всего комплекса РТС решаются не изолировано, а интегрировано в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой РТС, что обеспечивает оперативность, обоснованность, полноту, замкнутость и непротиворечивость синтезируемых управленческих решений, базирующихся на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных к настоящему времени в междисциплинарной отрасли системных знаний.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-01046 А в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пантелеев М.Г.* Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени // XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 октября 2014 г., Казань, Россия): Тр. конференции. В 3-т. Т. 1. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 323-333.
2. *Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.* Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и её расширения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – № 5. – С. 102-121.
3. *Федунов Б.Е.* Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 6. – С. 90-102.
4. *Федунов Б.Е.* Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов. – М.: Де`Либри, 2018. – 246 с.
5. *Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В.* Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // Известия ЮФУ. – 2011. – № 3. – С. 116-133.
6. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
7. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
8. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С.162-174.
9. *Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 7-15.
10. *Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Швецова А.А.* О подходах к предсказательному моделированию сложных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Экономика. Информатика». – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 140-148.
11. *Кулешов А.П.* Когнитивные технологии в адаптивных моделях сложных объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – Вып. 1. – С. 18-29.
12. *Кулешов А.П.* Технология быстрого вычисления характеристик сложных технических объектов // Информационные технологии. – 2006. – Вып. 3. – С. 4-11.
13. *Бернштейн А.В., Кулешов А.П.* Построение ортогональных нелинейных многообразий в задачах снижения размерности // Тр. VII Международной школы-семинара «Многомерный статистический анализ и эконометрика». Цахкадзор, 2008. – С. 25-27.
14. *Бернштейн А.В., Кулешов А.П.* Когнитивные технологии в проблеме снижения размерности описания геометрических объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – № 2. – С. 6-19.
15. *Иванова Е.П., Чернова С.С.* Снижение размерности сложных геометрических объектов при наличии частных параметрических моделей // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 3. – С. 53-58.

16. Бухановский А.В., Ковальчук С.В., Марьин С.В. Интеллектуальные высокопроизводительные программные комплексы моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 10. – С. 5-24.
17. Иванов С.В., Бухановский А.В. Анализ неопределенности предсказательного моделирования сложных систем: усвоение данных и ансамблевые технологии // Известия вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 12. – С. 66-68.
18. Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 596-603.
19. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Multiple-model description of control processes for air-spacecrafts // Journal Computer System Science International. – 1996. – No. 6. – P. 192-199.
20. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects // Int. J. Differ. Equ. – 1985. – Vol. 21. – P. 502-506.
21. Научно-технический отчет (промежуточный) по теме “Разработка технологии и создание экспериментальных программных комплексов управления конфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА в интересах повышения их живучести” (шифр “Технология-СГ-3.3.3.1”). – СПб.: СПИИРАН, 2018. – 450 с.
22. Кокорин С.В., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 17-22.
23. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Приборостроение. – 2016. – № 11. – С. 913-920.

#### REFERENCES

1. Pantelev M.G. Formal'naya model' operezhayushchego interaktivnogo planirovaniya deystviy intellektual'nykh agentov real'nogo vremeni [Formal model of advanced interactive planning of actions of intelligent real-time agents], *XIV natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014 (24-27 oktyabrya 2014 g., Kazan', Rossiya): Tr. Konferentsii* [XIV National Conference on Artificial Intelligence with International participation CII-2014 (October 24-27, 2014, Kazan, Russia): Proceedings of the conference]. In 3 vol. Vol. 1. Kazan: Izd-vo RITS «Shkola», 2014, pp. 323-333.
2. Gorodetskiy V.I., Samoylov V.V., Trotskiy D.V. Bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i ee rasshireniya [Basic ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2015, No. 5, pp. 102-121.
3. Fedunov B.E. Intellektual'nye agenty v bazakh znaniy bortovykh operativno-sovetuyushchikh ekspertnykh sistemakh tipovykh situatsiy funktsionirovaniya antropotsentricheskogo ob"ekta [Intelligent agents in the knowledge bases of on-board operational-advising expert systems of typical situations of functioning of an anthropocentric object], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2019, No. 6, pp. 90-102.
4. Fedunov B.E. Bortovye intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnya dlya antropotsentricheskikh ob"ektov [On-board intelligent systems of the tactical level for anthropocentric objects]. Moscow: De`Libri, 2018, 246 p.
5. Gorodetskiy V.I., Serebryakov S.V., Trotskiy D.V. Sredstva spetsifikatsii i instrumental'noy podderzhki komandnogo povedeniya avtonomnykh agentov [Means of specification and instrumental support of command behavior of autonomous agents], *Izvestiya YuFU* [Izvestiya SFedU], 2011, No. 3, pp. 116-133.
6. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p.
7. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.

8. *Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy kontseptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob"ektami [Theoretical and technological bases of the concept of proactive monitoring and management of complex objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 162-174.
9. *Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V.* Kontseptsiya proaktivnogo upravleniya slozhnymi ob"ektami: teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy [The concept of proactive management of complex objects: theoretical and technological foundations], *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya Vuzov. Instrumentation], 2014, Vol. 57, No. 11, pp. 7-15.
10. *Averin G.V., Zvyagintseva A.V., Shvetsova A.A.* O podkhodakh k predskazatel'nomu modelirovaniyu slozhnykh sistem [On approaches to predictive modeling of complex systems], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Ekonomika. Informatika»* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series "Economy. Informatics"], 2018, Vol. 45, No. 1, pp. 140-148.
11. *Kuleshov A.P.* Kognitivnye tekhnologii v adaptivnykh modelyakh slozhnykh ob"ektov [Cognitive technologies in adaptive models of complex objects], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems], 2008, Issue 1, pp. 18-29.
12. *Kuleshov A.P.* Tekhnologiya bystrogo vychisleniya kharakteristik slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Technology of fast calculation of characteristics of complex technical objects], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2006, Issue 3, pp. 4-11.
13. *Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P.* Postroenie ortogonal'nykh nelineynykh mnogoobraziy v zadachakh snizheniya razmernosti [Construction of orthogonal nonlinear manifolds in dimension reduction problems], *Tr. VII Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Mnogomernyy statisticheskiy analiz i ekonometrika». Tsakhkadzor, 2008* [Proceedings of the VII International School-Seminar "Multidimensional Statistical Analysis and Econometrics". Tsakhkadzor, 2008], pp. 25-27.
14. *Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P.* Kognitivnye tekhnologii v probleme snizheniya razmernosti opisaniya geometricheskikh ob"ektov [Cognitive technologies in the problem of reducing the dimension of the description of geometric objects], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computational systems], 2008, No. 2, pp. 6-19.
15. *Ivanova E.P., Chernova S.S.* Snizhenie razmernosti slozhnykh geometricheskikh ob"ektov pri nalichii chastnykh parametricheskikh modeley [Reducing the dimension of complex geometric objects in the presence of private parametric models], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2009, No. 3, pp. 53-58.
16. *Bukhanovskiy A.V., Koval'chuk S.V., Mar'in S.V.* Intellektual'nye vysokoproizvoditel'nye programmnye komplekсы modelirovaniya slozhnykh sistem: kontseptsiya, arkhitektura i primery realizatsii [Intelligent high-performance software complexes for modeling complex systems: concept, architecture, and Implementation examples], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2009, Vol. 52, No. 10, pp. 5-24.
17. *Ivanov S.V., Bukhanovskiy A.V.* Analiz neopredelennosti predskazatel'nogo modelirovaniya slozhnykh sistem: usvoenie dannykh i ansamblevye tekhnologii [Uncertainty analysis of predictive modeling of complex systems: data assimilation and ensemble technologies], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2013, Vol. 56, No. 12, pp. 66-68.
18. *Pavlov A.N., Kulakov A.Yu., Potryasaev S.A., Sokolov B.V.* Metody, algoritmy i tekhnologii rekonfiguratsii bortovykh sistem malomassorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Methods, algorithms and technologies of reconfiguration of onboard systems of small-mass-sized spacecraft], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2018, Vol. 61, No. 7, pp. 596-603.
19. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Multiple-model description of control processes for air-spacecrafts, *Journal Computer System Science International*, 1996, No. 6, pp. 192-199.
20. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects, *Int. J. Differ. Equ.*, 1985, Vol. 21, pp. 502-506.
21. Nauchno-tekhnicheskii otchet (promezhutochnyy) po teme "Razrabotka tekhnologii i sozдание eksperimental'nykh programmnykh kompleksov upravleniya konfiguratsiey bortovykh sistem malomassogabaritnykh KA v interesakh povysheniya ikh zhivuchesti" (shifr "Tekhnologiya-

- SG-3.3.3.1”) [Scientific and technical report (interim) on the topic "Development of technology and creation of experimental software systems for controlling the configuration of onboard systems of small-mass spacecraft in the interests of increasing their survivability" (code "Technologia-SG-3.3.3.1")]. Saint Petersburg: SPIIRAN, 2018, 450 p.
22. *Kokorin S.V., Potryasaev S.A., Sokolov B.V.* Kombinirovannyi metod planirovaniya operatsiy i raspredeleniya resursov sistemy upravleniya aktivnymi podvizhnymi ob"ektami [Combined method of planning operations and resource allocation of the active mobile objects management system], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2012, Vol. 55, No. 11, pp. 17-22.
23. *Potryasaev S.A.* Kompleksnoe modelirovanie slozhnykh protsessov na osnove notatsii BPMN [Complex modeling of complex processes based on BPMN notation], *Priborostroenie* [Instrumentation], 2016, No. 11, pp. 913-920.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Пименов.

**Кофнов Олег Владимирович** – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kofnov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79219413288; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; к.т.н.; с.н.с.

**Потрысаев Семен Алексеевич** – e-mail: spotryasaev@gmail.com; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; д.т.н.; с.н.с.

**Соколов Борис Владимирович** – e-mail: sokolov\_boris@inbox.ru; тел.: +79217918136; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; д.т.н.; профессор; Заслуженный деятель науки РФ; руководитель лаборатории.

**Трефилов Петр Михайлович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: petertrfi@gmail.com; Москва, Россия; лаборатория №80 «Киберфизических систем»; аспирант.

**Kofnov Oleg Vladimirovich** – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kofnov@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79219413288; laboratory of information technology in system analysis and modeling, senior researcher, cand. of eng. sc.

**Potryasaev Semyon Alekseevich** – e-mail: spotryasaev@gmail.com; laboratory of information technology in system analysis and modeling, senior researcher; dr. of eng. sc.

**Sokolov Boris Vladimirovich** – e-mail: sokolov\_boris@inbox.ru; phone: +78127918136; laboratory of information technology in system analysis and modeling; dr. of eng. sc.; professor; head of laboratory.

**Trefilov Peter Michailovich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: petertrfi@gmail.com; Moscow, Russia; laboratory 80; postgraduate student.

УДК 519.8.А

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-149-165

**А.А. Петунин, Е.Г. Полищук, С.С. Уколов**

### **НОВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ ОБХОДА КОНЕЧНОГО МНОЖЕСТВА НЕПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КОНТУРОВ НА ПЛОСКОСТИ\***

*Рассматривается проблема маршрутизации режущего инструмента машин листовой резки с ЧПУ для случая, когда точки врезки расположены на границах деталей, ограниченных отрезками прямых и дугами окружностей, при этом используется техника непре-*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственный контракт № 075-03-2020-582/4.