
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND TECHNOLOGIES OF PROACTIVE CONTROL OF COMPLEX OBJECTS

УДК 004.89
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-909-917

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Б. В. Соколов^{1*}, П. В. Степанов¹, Р. М. Юсупов¹, В. Н. Калинин²

¹ Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

* sokolov_boris@inbox.ru

² Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлено обобщенное описание разработанного специального модельно-алгоритмического и программно-информационного обеспечения проактивного управления группировкой интеллектуальных наземных транспортно-технологических средств (ИТТС) сервисного обслуживания судов гражданской авиации, функционирующих в едином цифровом пространстве данных аэропортов. В состав технологии функционирования каждого ИТТС входят типовые операции по загрузке/разгрузке мобильного оборудования; по перемещению по аэродрому; материальному, энергетическому и информационному взаимодействию с инфраструктурой аэропорта, другими ИТТС, а также воздушными судами. В этих условиях особую актуальность и научную новизну приобретают задачи проактивного управления как отдельными ИТТС, так и их группировкой. Разработанное специальное модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение базируется на динамическом многовариантном прогнозировании, а также комплексном планировании и оперативном управлении, основанном на модели взаимодействия систем Дж. Бойда и оригинальном полимодельном логико-динамическом описании исследуемой предметной области. Приведена обобщенная структура полимодельного комплекса, описывающего функционирование группировки ИТТС.

Ключевые слова: интеллектуальное транспортно-технологическое средство, проактивное управление, специальное модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767/>.

Ссылка для цитирования: Соколов Б. В., Степанов П. В., Юсупов Р. М., Калинин В. Н. Модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение проактивного управления группировкой интеллектуальных транспортно-технологических средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 11. С. 909–917. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-909-917.

MODEL-ALGORITHMIC AND SOFTWARE-INFORMATION SUPPORT FOR PROACTIVE CONTROL OF A GROUP OF INTELLIGENT TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MEANS

B. V. Sokolov^{1*}, P. V. Stepanov¹, R. M. Yusupov¹, V. N. Kalinin²

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia

* sokolov_boris@inbox.ru

² A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

Abstract. A generalized description of the developed special model-algorithmic and software-information support for proactive control of a group of intelligent ground transport and technological means (ITTM) for servicing civil aviation aircrafts, operating in a single digital space of airport data is presented. The technology of functioning of each ITTM includes typical operations for loading/unloading mobile equipment, moving around the airfield, material, energy, information interaction with the airport infrastructure, with other ITTM, as well as aircraft. In these conditions, the tasks of proactive control of both individual ITTM and their group acquire special relevance and scientific novelty. The developed special model-algorithmic and software-information support is based on dynamic multi-variant forecasting, as well as integrated planning and operational management based on the model of interaction of systems by J. Boyd and the original poly-model logical-dynamic description of the studied subject area. A generalized structure of a poly-model complex describing the functioning of the ITTM group is presented.

Keywords: intelligent transport and technological means, proactive management, special model-algorithmic and software-information support

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767/>.

For citation: Sokolov B. V., Stepanov P. V., Yusupov R. M., Kalinin V. N. Model-algorithmic and software-information support for proactive control of a group of intelligent transport and technological means // *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 11. P. 909–917 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-909-917.

Введение. В настоящее время в 12 аэропортах Российской Федерации и Республики Беларусь широкомасштабно внедрены и успешно применяются более 120 наземных комплексов отечественных интеллектуальных транспортно-технологических средств (ИТТС) сервисного обслуживания судов гражданской авиации. Данные комплексы функционируют в едином цифровом пространстве аэропортов [1]. Общая архитектура комплекса ИТТС и его основных подсистем представлена на рис. 1.

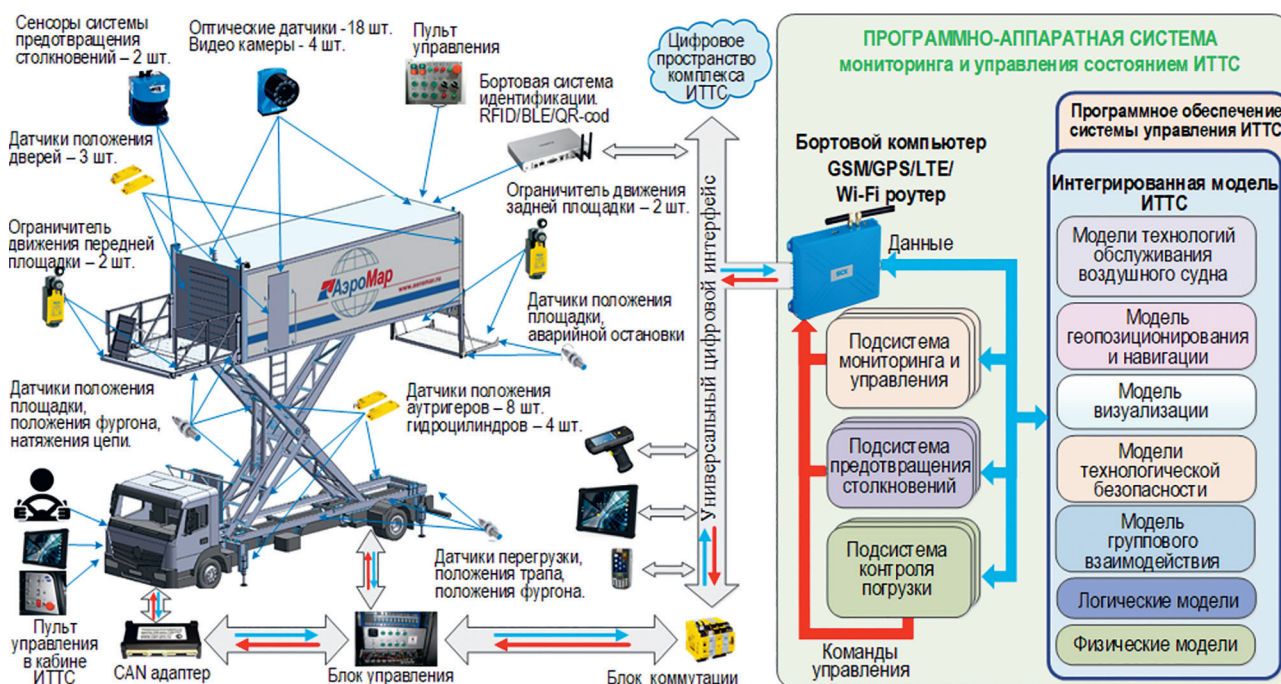


Рис. 1

Новизна комплекса ИТТС состоит в интеллектуальной системе проактивного (упреждающего) управления, которая базируется на киберфизических устройствах, а также интеллектуальных цифровых интерфейсах и позволяет согласованно и эффективно решать задачи проактивного управления группировкой ИТТС, управления их техническим состоянием, процессами сервисного обслуживания, видеофиксации, геопозиционирования и предотвращения столкновений [1]. Для повышения оперативности подготовки воздушных судов (ВС) к полетам предусмотрены режимы и технологии их группового обслуживания ИТТС. На рис. 2 представлены различные сценарии организации группового функционирования данных средств.

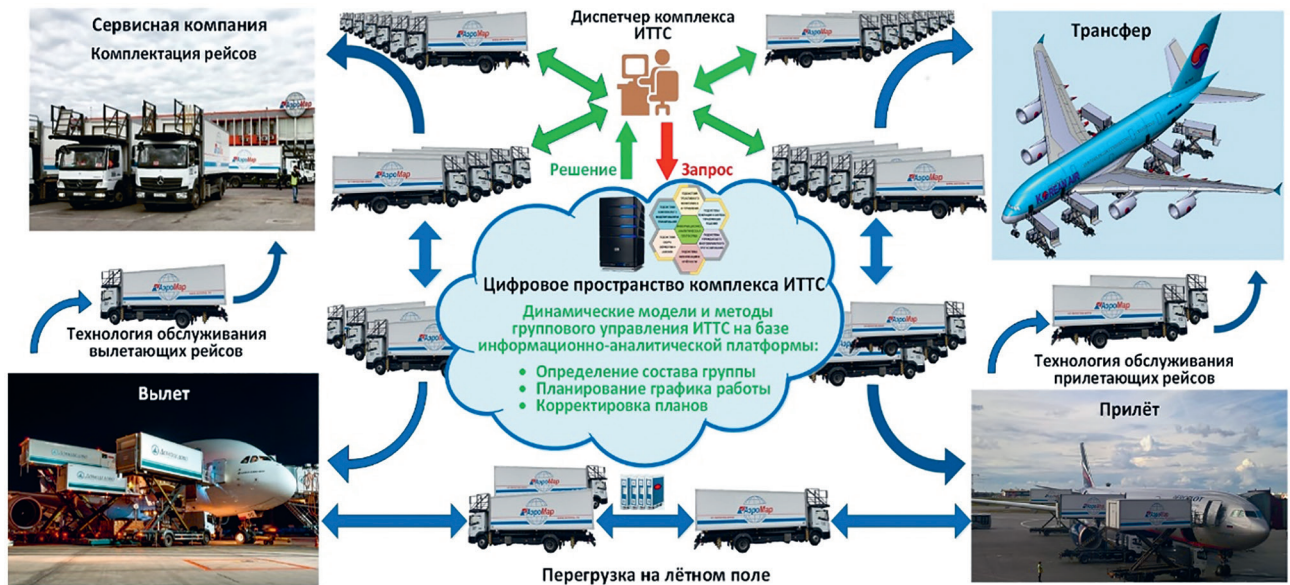


Рис. 2

Для эффективного и устойчивого функционирования рассматриваемых ИТТС необходимо правильно организовать процессы управления как отдельными ИТТС, так и их группировкой. С этой целью было разработано соответствующее специальное модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение.

Обоснование облика специального модельно-алгоритмического и программно-информационного обеспечения. В основу созданного комплекса моделей и алгоритмов проактивного управления группировкой ИТТС положены идеи и концепции, разработанные при проектировании и использовании подобных комплексов, получивших в свое время название систем, основанных на поведении (англ. Behavior-Based Systems — BBS) [2, 3]. Соответствующие модели называются иногда для краткости поведенческими моделями. В указанных системах интеллект формируется как результат индивидуального поведения множества физических сущностей (в данном случае ИТТС) и/или виртуальных сущностей (например, программных агентов в динамической среде) и их взаимодействия.

Как указывалось в работе [3], „...BBS-системы, во-первых, рассматривают не отдельные шаги поведения в виде реакции на входную информацию, а паттерны поведения (многошаговые действия), и, во-вторых, 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 главная особенность исследуемых комплексов ИТТС заключается в том, что они представляют собой сеть распределенных агентов (каждого отдельного ИТТС), функционирующих в реальном масштабе времени в среде с возмущающими воздействиями. Вторая особенность группировки ИТТС как сложного объекта (СЛО) состоит в том, что управление ею основывается на *концепции проактивного управления*. Под проактивным понимается управление, отличающееся от тра-

диционно используемого на практике **реактивного управления** слонным объектом тем, что оно ориентировано на упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счет создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующей системе проактивного управления новых системно-функциональных резервов, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования [4, 5]. Отметим, что при реализации классического реактивного управления СлО происходит оперативное реагирование на уже произошедшие негативные события и организуется парирование их последующего лавинообразного развития.

Таким образом, для рассматриваемого сетевого объекта (группировки ИТТС) все управленческие процессы привязаны либо к прогнозируемым событиям (на этапе планирования и составления расписания работы ИТТС), либо к реальному времени (на этапе оперативного управления). Другими словами, при проактивном управлении временные аспекты работы системы имеют решающее значение. Поэтому для указанных ситуаций целесообразно использовать модель взаимодействия систем, предложенную Дж. Бойдом [6, 7], в которой взаимодействующие системы имеют стандартный замкнутый цикл функционирования, состоящий из четырех фаз — наблюдение, ориентация, решение, действие. Следует отметить, что данная технология была предложена ранее (в 1984 г.) в работах отечественных ученых применительно к проблематике управления гибкими автоматизированными производствами [2, 3]. На рис. 3, отображающем цикл Бойда в системе управления реальным временем с цифровым двойником (ЦД) внешней среды, указанные фазы названы соответственно „восприятие“, „оценка и прогноз ситуации“, „принятие решения“, „реализация решения (действий)“. Как следует из рис. 3, каждый объект (в данном случае ИТТС) должен иметь свою модель и средства отслеживания действий других объектов, которая позволит каждому из них прогнозировать фазы цикла Бойда, прогнозировать свое поведение и поведение других объектов, 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 сетевым объектом задает схему (метамодель) управления в реальном времени.

Следуя работам [2–5], содержательную постановку задачи проактивного управления группировкой ИТТС можно описать следующим образом.

Дано:

1) Горизонт планирования $[T_0, T_k]$, где T_0 и T_k — (календарное) время начала и окончания процесса проактивного управления группировкой ИТТС, причем значение T_k может задавать как самое позднее допустимое время окончания выполнения сценария групповой работы ИТТС или время T_k в постановке задачи может быть не задано.

2) Возможные технологии (сценарии, паттерны) проактивного управления группировкой ИТТС (см. рис. 2 и 3), т. е. частично-упорядоченное множество действий X , которые должны быть выполнены на заданном временном горизонте для достижения поставленной цели. Сами возможные технологии проактивного управления группировкой ИТТС задаются с помощью соответствующих динамических смешанных ограничений в рамках разработанных ранее логико-динамических моделей [4, 5, 8, 9].

3) Группировка ИТТС, каждому из которых поставлены в соответствие список элементарных действий сценария (элементарные, неделимые операции), требуемых к выполнению (загрузка/разгрузка мобильного оборудования, перемещение по аэродрому, материальное, энергетическое, информационное взаимодействие с инфраструктурой аэропорта, другими ИТТС, ВС), а также и временные интервалы доступности объектов аэропорта.

4) Множество специфических предметно-ориентированных ограничений по использованию ИТТС на множестве действий (операций), входящих в состав технологии проактивного управления (например, по техническому состоянию, погодным условиям и т. п.).

5) Показатель качества решения задач проактивного управления (задач планирования, коррекции плана, перепланирования, оперативного управления) $F(P(X, D([T_0, T_k])))$, где $P(X, D([T_0, T_k]))$ — скоординированное в пространстве и во времени распределение множества ИТТС $D([T_0, T_k]) = \{D_j([T_0, T_k])\}_{j=1}^M$ на горизонте планирования $[T_0, T_k]$ на множестве действий $X = \{X_i\}_{i=1}^N$ сценария.

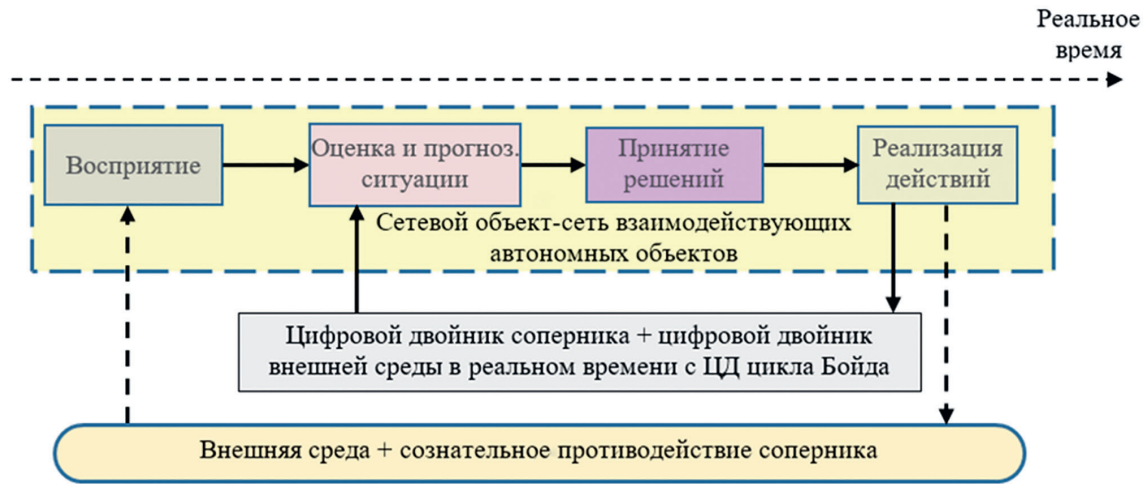


Рис. 3

Требуется: осуществить оптимальное, с точки зрения обобщенного показателя качества F , связанного с сервисным обслуживанием ВС, распределение $P(X, D([T_0, T_k]))$ ИТТС в пространстве и во времени на множестве действий (операций), входящих в состав технологии проактивного управления, с учетом всех динамических ограничений.

Данное распределение должно поддерживаться на программном уровне как на этапе планирования, так и на этапе оперативного управления (в том числе коррекции ранее составленных планов, перепланирования). На последней фазе цикла Бойда (фазе оперативного принятого решения) план выполняется. Этот компонент задачи проактивного управления группировкой ИТТС в значительной части является предметно зависимым и реализуется на основе созданного модельно-алгоритмического и программно-информационного обеспечения. При этом за счет разработанной технологии проактивного управления группировкой ИТТС время выполнения запланированных действий каждым ИТТС на каждой фазе должно по возможности опережать вероятные реализации сценариев возмущающих воздействий. Данное опережение базируется на разработанных ранее моделях, методах и алгоритмах комплексного предсказательного моделирования развивающейся ситуации, которое описывает процессы проактивного управления структурной динамикой объектов в исследуемой предметной области [4, 5].

Следуя работам [2–4], принятие решений в цикле Бойда для сетевого объекта рассматриваемого класса (группировки ИТТС) в начальный момент времени состоит, во-первых, в решении задачи формирования сценария (технологии) достижения поставленной цели, описанной в пространстве многоструктурных макросостояний, и, во-вторых, в решении задачи динамического распределения операций, входящих в сценарий функционирования ИТТС. Формально эти задачи хорошо известны из литературы как компоненты задачи планирования действий и оперативного управления ими, и для ее решения предложено достаточно много подходов, моделей и алгоритмов. Так, например, алгоритм опережающего планирования в реальном времени в контексте цикла Бойда предложен в [3].

В отличие от работы [3], где в качестве формального аппарата описания и решения перечисленных выше задач предлагалось использовать атрибутную формальную грамматику либо модели и алгоритмы, в основе которых лежит поиск на графах типа „и — или“, в данной статье используется методология и технологии комплексного предсказательного моделирования процессов проактивного управления функционированием самоорганизующейся группировки

ИТТС, где в качестве базовых моделей применяются новые логико-динамические модели (ЛДМ), представленные на рис. 4 [4, 5, 8, 9].

На рисунке приняты следующие обозначения: M_g — ЛДМ управления движением ИТТС (в которых учитываются сложные пространственно-временные ограничения, связанные с перемещением ИТТС); M_k — ЛДМ управления каналами ИТТС, по которым осуществляется взаимодействие ИТТС друг с другом и окружающей средой; M_o — ЛДМ управления операциями сервисного обслуживания ВС с использованием ИТТС; M_{Π} — ЛДМ управления потоками (материальными, энергетическими, информационными) в ИТТС; M_p — ЛДМ управления ресурсами ИТТС; M_e — ЛДМ управления параметрами операций; M_c — ЛДМ управления структурной динамикой как ИТТС, так и группы (комплекса) ИТТС; M_v — ЛДМ управления вспомогательными операциями.

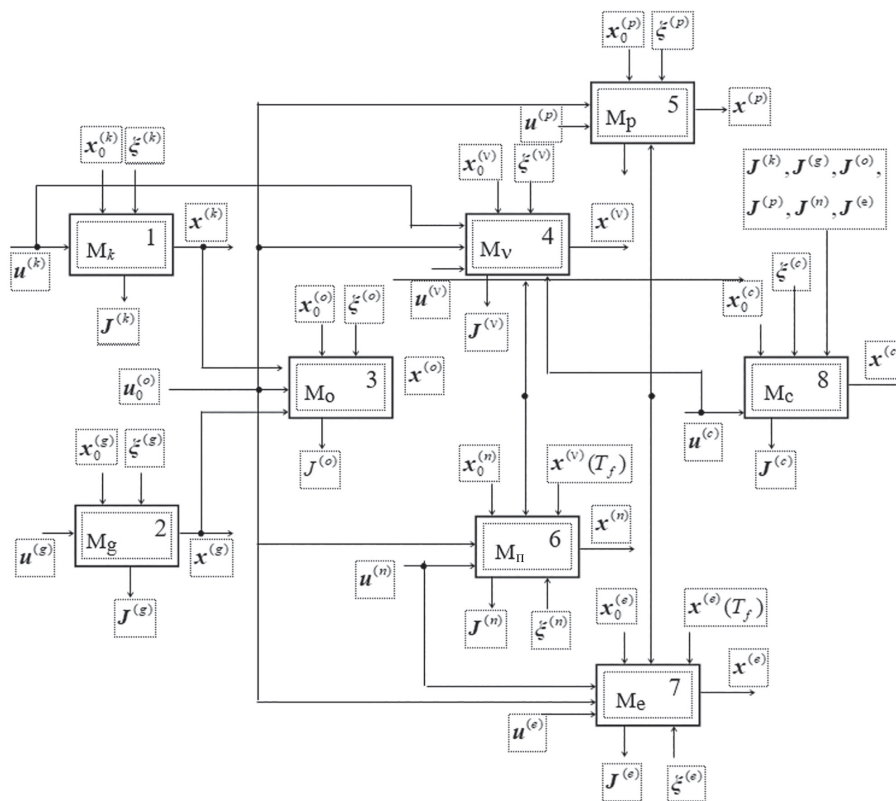


Рис. 4

Одно из основных достоинств разработанных к настоящему времени 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 (ИТТС) с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) [4]. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей группировки ИТТС, базирующихся на конечно-автоматных, имитационных и агентно-ориентированных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать задачи оперативного структурно-функционального синтеза как облика группировки ИТТС и систем управления ими, так и соответствующих ИИТ проактивного мониторинга, прогнозирования и управления, а также синтеза сценариев их поведения. Для этого разработаны соответствующие комбинированные методы и алгоритмы, представляющие собой новые модификации метода локальных сечений Болтянского, метода ветвей и границ,

метода пси-преобразований и метода основных осей Брента. Другое достоинство предложенного варианта формализации проактивного управления структурной динамикой ИТТС состоит в том, что на его основе разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования (коррекции планов, перепланирования) и проактивного 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) и ранее предложенных их расширениях [10]. И, наконец, самое главное, предлагаемый новый математический аппарат управляемой структурной динамики ИТТС позволяет реализовать процессы целенаправленного выбора данными объектами своей внутренней организации, что демонстрирует основное свойство самоорганизующихся сложных технических объектов [4, 5, 10].

На рис. 5 представлена обобщенная структура специального программно-информационного обеспечения проактивного управления группировкой ИТТС при проведении сервисного обслуживания ВС (здесь Микро-ЦОД — микроцентр обработки данных).

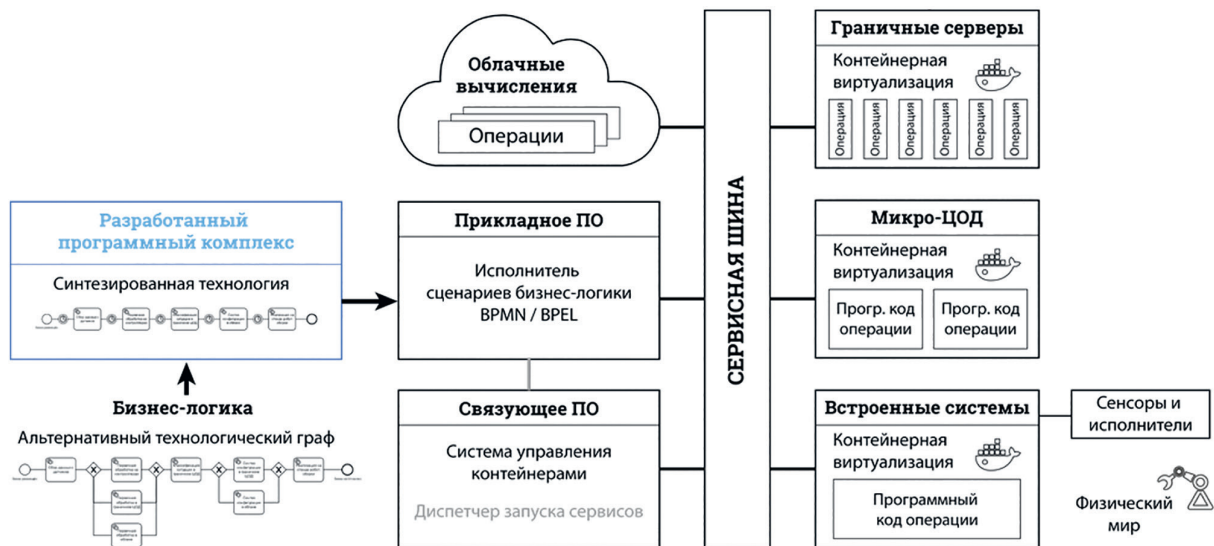


Рис. 5

Заключение. Представленное разработанное специальное модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение проактивного управления группировкой ИТТС является одной из особенностей созданной системы проактивного управления сервисным обслуживанием ВС. Данное обеспечение базируется на динамическом многовариантном прогнозировании, а также комплексном планировании и оперативном управлении, основанном на модели взаимодействия систем Дж. Бойда и оригинальном полимодельном логико-динамическом описании исследуемой предметной области. Проактивное управление группировкой ИТТС с использованием разработанных новых модификаций метода локальных сечений Болтянского, метода ветвей и границ, метода пси-преобразований, метода основных осей Брента позволяет существенно повысить эффективность и устойчивость использования ИТТС в постоянно меняющихся условиях функционирования аэропорта, особенно в нештатных ситуациях. Также, как показала практика, организация проактивного управления группировкой ИТТС позволяет существенно уменьшить парк используемых транспортных средств для сервисного обслуживания воздушных судов [1,10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потрясаев С. А., Ронжин А. Л., Соколов Б. В., Джао В. Ю.-Д., Степанов П. В., Стыскин М. М. Полимодельный комплекс мобильной сервисной системы, предназначенной для обслуживания воздушных судов // Информатизация и связь. 2020. № 6. С. 113–118. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.003.
2. Городецкий В. И., Самойлов В. В., Троцкий Д. В. Базовая онтология коллективного поведения и ее расширение // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2015. № 5. С. 102–121.
3. Пантелеев М. Г. Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени // Тр. XIV Национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014, 24–27 окт. 2014 г., Казань. Казань: РИЦ „Школа“, 2014. Т. 1. С. 323–333.
4. Юсупов Р. М., Соколов Б. В., Охтилев М. Ю. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С. 162–174.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Coram R. Boyd: The Fighter Pilot Who Changed the Art of War. N. Y.: Little, Brown, 2002.
7. Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. М.: МО РФ, 2008. 64 с.
8. Калинин В. Н. Космический аппарат как объект системных исследований // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2013. Вып. 640. С. 80–89.
9. Калинин В. Н. Теория управления космическим аппаратом (на основе концепции активного подвижного объекта): Монография. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. 188 с.
10. <http://litsam.ru>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Владимирович Соколов

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Павел Викторович Степанов

— СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. научный сотрудник; E-mail: p.v.stepanov@hotmail.com

Рафаэль Мидхатович Юсупов

— д-р техн. наук, чл.-кор. РАН; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория прикладной информатики и проблем информатизации общества; руководитель научного направления СПИИРАН; E-mail: yusupov@iiias.spb.su

Владимир Николаевич Калинин

— д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского; E-mail: kvn.112@mail.ru

Поступила в редакцию 23.07.24; одобрена после рецензирования 29.07.24; принята к публикации 23.09.24.

REFERENCES

1. Potryasaev S.A., Ronzhin L.A., Sokolov B.V., Zhao V.Yu.D., Stepanov P.V., Styskin M.M. *Informatization and communication*, 2020, no. 6, pp. 113–118, DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.003 (in Russ.)
2. Gorodetsky V.I., Samoylov V.V., Trotskii D.V. *Journal of Computer And Systems Sciences International*, 2015, no. 5, pp. 765–782.
3. Panteleev M.G. *XIV natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiyem KII-2014* (XIV National Conference on Artificial Intelligence with International Participation KII-2014), Kazan, Russia, October 24–27, 2014, Conf. Proc., 2014, vol. 1, pp. 323–333. (in Russ.)
4. Yusupov R.M., Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 1(162), pp. 162–174. (in Russ.)
5. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
6. Coram R. *Boyd: The Fighter Pilot Who Changed the Art of War*, NY, Little, Brown, 2002.
7. Ivlev A.A. *Osnovy teorii Boyda. Napravleniya razvitiya, primeneniya i realizatsii* (Fundamentals of Boyd's Theory. Directions of Development, Application and Implementation), Moscow, 2008, 64 p. (in Russ.)
8. Kalinin V.N. *Trudy VKA im. A.F. Mozhayskogo*, 2013, no. 640, pp. 80–89. (in Russ.)

9. Kalinin V.N. *Teoriya upravleniya kosmicheskim apparatom* (na osnove kontseptsii aktivnogo podvizhnogo ob"yektu) (Theory of Spacecraft Control (Based on the Concept of an Active Mobile Object), St. Petersburg, 2014, 188 p. (in Russ.)
10. <http://litsam.ru>. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

- Boris V. Sokolov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
- Pavel V. Stepanov** — St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, Junior Researcher; E-mail: p.v.stepanov@hotmail.com
- Rafael M. Yusupov** — Dr. Sci., Corresponding Member of the RAS; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Applied Informatics and Problems of Information Society; Head of Research; E-mail: yusupov@ias.spb.su
- Vladimir N. Kalinin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; E-mail: kvn.112@mail.ru

Received 23.07.24; approved after reviewing 29.07.24; accepted for publication 23.09.24.