
МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

METHODOLOGY AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX OBJECTS CONTROL

УДК 519.4

DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

М. Ю. ОХТИЛЕВ, П. А. ОХТИЛЕВ, Б. В. СОКОЛОВ*, Р. М. ЮСУПОВ

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

**sokolov_boris@inbox.ru*

Аннотация. Рассматриваются методологические и методические основы, использованные при создании отечественной информационно-аналитической платформы и соответствующих информационных систем. Указанная методология базируется на двух новых прикладных теориях: теории проактивного (упреждающего) управления жизненным циклом сложных технических объектов, а также дополняющей ее теории многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов, описывающих функционирование сложных технических объектов и соответствующих информационно-аналитических систем. Последняя теория названа авторами квалиметрией моделей и полимодельных комплексов. Данные две теории вносят существенный вклад в развитие современной информатики: благодаря теории проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов современная информатика на конструктивном уровне обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике (обобщенной теории управления); благодаря разработанной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов в информатике появился новый математический аппарат, позволяющий повысить обоснованность и качество проектных решений по созданию программно-математического обеспечения информационных систем, снизить стоимость их проектирования и эксплуатации. Приведены краткие сведения о практической реализации разработанных теорий.

Ключевые слова: *информационно-аналитическая платформа, информационно-аналитическая система, проактивное управление, квалиметрия моделей и полимодельных комплексов, киберфизические системы, жизненный цикл системы, сложные технические объекты*

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Ссылка для цитирования: *Охтилев М. Ю., Охтилев П. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 781—788. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788.*

METHODOLOGICAL AND METHODICAL PRINCIPLES OF PROACTIVE LIFE CYCLE MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

M. Yu. Okhtilev, P. A. Okhtilev, B. V. Sokolov*, R. M. Yusupov

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,

St. Petersburg, Russia

**sokolov_boris@inbox.ru*

Abstract. Basic methodological and methodical principles used in the creation of the domestic information and analytical platform and corresponding information systems are considered. This methodology is based on application of two novel theories: the theory of proactive (anticipatory) life cycle management of complex technical objects, as well as its complementary theory of multi-criteria evaluation and selection of the most preferred models and polymodel complexes describing the functioning of complex technical objects and corresponding information and analytical systems. The latter theory is called by the authors the qualimetry of models and polymodel complexes. These two theories make a significant contribution to the development of modern computer science: thanks to the theory of proactive life cycle management of complex technical objects, modern computer science is enriched at a constructive level with methods and methodological support developed in the frames of classical cybernetics (generalized control theory); thanks to the developed qualimetry of models and polymodel complexes, a new mathematical apparatus has appeared in computer science, which makes it possible to increase the validity and quality of design solutions in creation of software and mathematical support for information systems, reduce the cost of their design and operation. Brief information about the practical implementation of the developed theories is presented.

Keywords: information and analytical platform, information and analytical system, proactive control, qualimetry of models and polymodel complexes, cyber-physical systems, system life cycle, complex technical objects

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 22-19-00767.

For citation: Okhtilev M. Yu., Okhtilev P. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Methodological and methodical principles of proactive life cycle management of complex technical objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 781—788 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-781-788.

Введение. В настоящее время в условиях усиливающегося санкционного давления в наукоемких отраслях отечественной экономики, к числу которых относится и сфера информационно-аналитических управляющих систем, особую значимость приобретают поставленные Президентом РФ и Правительством РФ цель и задачи по разработке и реализации отечественной стратегической инициативы и соответствующих комплексных программ развития перспективных интеллектуальных информационных технологий и систем для моделирования, прогнозирования и принятия управленческих решений, связанных с повышением эффективности экономики и качества жизни населения, а также укрепления обороноспособности и обеспечения национальной безопасности.

Авторы настоящей статьи и возглавляемые ими научные и производственные коллективы в течение уже более тридцати лет выполняют, в том числе в рамках реализации указанной цели, широкомасштабные работы, связанные с созданием, внедрением и использованием отечественной информационно-аналитической платформы (ИАП) проактивного управления жизненным циклом (ЖЦ) сложных технических объектов (СТО) в различных отраслях экономики. Данная ИАП, как показывает анализ, отвечает всем современным требованиям, которые предъявляются к российским информационным системам с точки зрения импортозамещения, а в перспективе и импортоопережения [1, 2]. При решении задач создания, применения и развития (модернизации) рассматриваемой ИАП особую *актуальность* представляют вопросы разработки методологических и методических основ многокритериального структурно-функционального синтеза облика указанной платформы и соответствующих информационно-аналитических систем (ИАС), созданных на ее базе с учетом особенностей конкретных предметных областей.

Переход к методологии проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов. Необходимость решения существующих проблем создания и внедрения новых поколений систем управления ЖЦ СТО привела к проведению отечественными и зарубежными научными школами значительного количества фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований [3—8]. При этом неопределенность сценариев развития для таких высокоинерционных объектов, к каким относятся сами СТО и их системы управления, требует перехода от традиционной *концепции реактивного управления* данными объектами к *концепции проактивного управления*.

Под *проактивным управлением ЖЦ СТО* понимается такой *целенаправленный многоэтапный многофункциональный процесс*, который, в отличие от традиционно используемого *реактивного управления*, основанного на оперативном реагировании и последующем недопущении и компенсации возможных нештатных и аварийных ситуаций, возникающих на различных этапах ЖЦ СТО (с использованием заранее выделенных резервов), предполагает предотвращение возникновения указанных ситуаций за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методах и технологиях системного (комплексного) моделирования и ориентированных, прежде всего, на использование (либо поиск) имеющихся функциональных резервов [4].

Переход к реализации концепции проактивного управления ЖЦ СТО требует проведения широкомасштабных фундаментальных и прикладных исследований, направленных на разработку методологических и методических основ организации такого рода управления, реализуемого на основе органичной интеграции концепций и технологий современных теории организационного управления (менеджмента), общей теории систем, некибернетики и информатики [9]. В качестве примера такого рода исследований можно привести международный проект PROMISE [6—8], в котором участвовали 22 организации из Евросоюза, Швейцарии, Японии, Австралии и США. Данный проект был успешно завершен в 2008 г. В результате выполнения этого проекта была предложена более совершенная технология управления ЖЦ (по сравнению с существующими технологиями PLM и ИПИ), которая получила название CL₂M (Closed Loop Lifecycle Management — управление ЖЦ с обратной связью) [6—8].

Целевая ориентация новой концепции CL₂M — обеспечение принятия управленческих решений в течение ЖЦ СТО на основе **знаний**. В этом случае перспективная система проактивного управления ЖЦ СТО должна функционировать по следующей технологии:

Данные → Информация → Знания → Решение → Действие.

Методология CL₂M расширяет область применения PLM до КМ (Knowledge Management — управление знаниями), т.е. до управления не только техническими изделиями, но и любыми искусственными объектами, в том числе и организационными областями, например, такими, как промышленность, здравоохранение, цепи поставок, технологии изготовления лекарств, продуктов питания и др. Эта технология в перспективе может быть также применена по отношению к людям, животным, инфраструктуре и услугам.

В проекте PROMISE рассматриваются три фазы ЖЦ СТО:

— *начальная* (Beginning of Life — BOL) — фаза создания, включающая в себя проектирование и производство;

— *средняя* (Middle of Life — MOL) — фаза, включающая в себя применение (использование), техническое обслуживание и различные услуги, в том числе ремонт;

— *конечная* (End of Life — EOL) — фаза, которая может характеризоваться различными сценариями: повторным использованием изделия после его модернизации, повторным использованием составных частей или материалов изделия после его разборки, применением новых материалов с улучшенными свойствами, передачей (продажей) для использования по новому назначению или для уничтожения.

В проекте PROMISE было сфокусировано внимание на полном ЖЦ, но основной акцент сделан на необходимости обеспечения обратной связи фаз MOL и EOL с первой фазой BOL. Это было вызвано необходимостью учета следующих обстоятельств: на практике обмен информацией между входящими в состав BOL этапами — проектированием и производством — осуществляется достаточно эффективно благодаря таким интеллектуальным информационным системам, как CAD/CAM. Системы PDM и КМ также эффективно используются предприятиями промышленности и поставщиками. Вместе с тем поток информации между фазами BOL,

МОЛ и ЕОЛ гораздо слабее. Для большинства технических изделий, особенно высокотехнологичных, выработавших назначенный ресурс, изделий бытовой электроники, холодильников, стиральных машин, транспортных средств и т.д., поток информации о них практически обрывается после поставки потребителю, так как обратная связь от потребителей к разработчикам и производителям отсутствует. В настоящее время для обеспечения такой обратной связи в рамках технологии CL_2M планируется широкомасштабное использование киберфизических систем (КФС), которые приходят на смену встроенным системам.

Дальнейшим развитием концепций PROMISE и e-maintenance стали многочисленные концептуальные и практические разработки, связанные с внедрением в различные области человеческой деятельности высоких технологий на интернет-платформе (например, индустриальный Интернет, Интернет вещей), выполненные в различных странах. Данные разработки применительно к космической сфере являются весьма привлекательными, так как в условиях большой кооперации и территориальной распределенности исполнителей перспективных программ научно-технического и технологического развития требуется соответствующая перспективная информационно-коммуникационная среда.

В качестве примера создания проекта „производственного Интернета“ можно привести реализуемую в Германии в настоящее время концепцию Industry 4.0, или концепцию четвертой промышленной революции. Аналоги такой программы существуют и в других странах: „Smart Factory“ в Нидерландах, „Usine du Futur“ во Франции, „High Value Manufacturing Catapult“ в Великобритании, „Fabbrica del Futuro“ в Италии, „Сделано в Китае-2025“ и т.п. В США также обсуждается будущее индустриального производства: так, например, в 2014 г. компании General Electric, AT&T, Cisco, IBM и Intel создали Консорциум промышленного Интернета (Industrial Internet Consortium), который сегодня включает уже 170 членов.

Согласно концепции Industry 4.0., производственное оборудование и производимые им изделия должны стать активными системными компонентами, управляющими своими производственными и логистическими процессами. Они будут включать в себя КФС, связывающие виртуальное пространство Интернета с реальным физическим миром. КФС — это системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, которые представляют собой единое целое. В КФС обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Область действия КФС распространяется на робототехнику, транспорт, энергетику, управление промышленными процессами и крупными инфраструктурами. От существующих мехатронных систем КФС будут отличаться наличием интеллекта и способностью взаимодействовать со своим окружением; планировать и адаптировать собственное поведение согласно окружающим условиям; учиться новым моделям и линиям поведения и самооптимизироваться [6—8]. Ключевой особенностью в КФС является модель, используемая в ее системе управления, — от того, как она соотносится с реальностью, зависит работоспособность и эффективность КФС [6].

Разработчиками отечественной концепции проактивного управления ЖЦ СТО в качестве стратегической цели (миссии) определено формирование методологии *обеспечения технологической независимости* от зарубежных производителей в области создания, эксплуатации и модернизации модельно-алгоритмического, технического, информационного и программного обеспечения процессов комплексной автоматизации и интеллектуализации проактивного управления ЖЦ СТО. Реализация этой цели возможна на основе *принципиально нового подхода* к проектированию и применению соответствующих АСУ СТО (либо ИАС). Данный подход базируется на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных авторами настоящей статьи в рамках развиваемых ими двух прикладных теорий: теории проактивного управления структурной динамикой сложных объектов и теории многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих процессы функционирования СТО и соответствующих АСУ (ИАС)

на различных этапах их ЖЦ (в дальнейшем для краткости последнюю теорию будем называть квалиметрией моделей и ПМК).

Рассмотрим более подробно методологические и методические основы данных теорий.

Научные и практические результаты. Говоря о разработанной теории проактивного управления ЖЦ СТО необходимо, прежде всего, выделить основные классы задач, решаемых в рамках данной теории [9]: задачи целенаправленного и обоснованного расширения разнообразия в интеллектуальных системах управления (сужения разнообразия внешней среды); задачи декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, линеаризации, аппроксимации, релаксации при моделировании, анализе и синтезе адаптивных и самоорганизующихся интеллектуальных технологий и систем проактивного управления СТО; задачи квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, описывающих указанные технологии и системы.

Как показали исследования, в рамках предлагаемой динамической интерпретации процессов проактивного управления ЖЦ СТО и соответствующего полимодельного комплекса возможно формально описать и одновременно решить не только непосредственно задачи проактивного управления ЖЦ указанных объектов, но и задачи создания и применения соответствующих ИАС, обеспечивающих формирование и устойчивую реализацию синтезированного проактивного управления СТО. К данным задачам относятся: проектирование облика модернизируемой/разрабатываемой ИАС (поиск ответа на вопрос — что и когда необходимо модернизировать/разрабатывать); определение срока (момента времени), к которому следует завершить модернизацию/разработку; синтез технологии модернизации/разработки (поиск ответа на вопрос — в какой последовательности следует проводить модернизацию/разработку); формирование и реализация плана проведения модернизации/разработки.

При традиционном проектировании указанные задачи из-за большой размерности решаются с помощью последовательно-параллельной пространственно-временной декомпозиции исходной общей задачи структурно-функционального синтеза облика ИАС проактивного управления ЖЦ СТО без оценивания погрешностей, вызванных использованием соответствующих эвристик и процедур декомпозиции. В этом случае вопросы доказательства полноты, замкнутости и непротиворечивости предлагаемых проектных решений остаются открытыми. В рамках динамической интегративно-управленческо-стоимостной интерпретации процессов создания и применения ИАС ЖЦ СТО, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах современной теории принятия решений, исследований операций, теории систем и управления, информатики удалось на конструктивном уровне подойти как к решению всех перечисленных задач структурно-функционального синтеза и управления развитием ИАС ЖЦ СТО, так и к доказательству корректности соответствующих процедур.

Разработанная теория проактивного управления ЖЦ СТО вносит существенный вклад в развитие современной информатики: благодаря ей современная информатика на конструктивном уровне обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике (обобщенной теории управления). В таблице наряду с известными результатами классической кибернетики, которые до последнего времени не использовались в информатике, представлены результаты, полученные в классической кибернетике, которые привнесены авторами в информатику в ходе создания единой отечественной информационно-аналитической платформы проактивного управления жизненным циклом сложных объектов.

При этом данные результаты применительно к рассматриваемой проблематике имеют более широкую трактовку. Это вызвано тем, что в одна из главных тенденций в области информационных технологий связана с созданием и широким использованием интернет-платформ в различных предметных областях материального производства и оказания услуг (сервисов). Созданная авторами ИАП является одной из реализаций интернет-платформы.

Поэтому рассматриваемая прикладная теория и ее конкретные результаты ориентированы на более общую перспективу.

Фундаментальные научные результаты, полученные в классической кибернетике	Новые научные результаты, привнесенные авторами в современную информатику
Условия управляемости, достижимости и наблюдаемости в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач проверки реализуемости технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете. Выявление основных факторов (ограничений), влияющих на показатели, оценивающие эффективность проактивного управления ЖЦ сложных объектов
Условие существования и единственности оптимального управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) оценивания возможности получения оптимальных решений в задачах синтеза технологии и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном Интернете
Необходимые и достаточные условия оптимальности в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач формирования структуры технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете
Методы и алгоритмы решения задач оптимального управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач автоматизации комплексного планирования (на уровне автоматизированных систем управления предприятием, производственными и технологическими процессами, проектирования производства), мониторинга, оперативного управления, координации информационных процессов в промышленном Интернете
Условия устойчивости и чувствительности в задачах управления динамическими системами	Математический аппарат (модели, методы, алгоритмы) решения задач оценивания устойчивости (чувствительности) синтезированных технологии и комплексных планов проактивного управления информационными процессами в промышленном Интернете к возможным возмущающим воздействиям, изменению состава и структуры исходных данных

Вторая из разработанных теорий — квалиметрия моделей и ПМК, описывающих управляемую структурную динамику СТО, предоставляет разработчикам, исследователям и эксплуатационникам научно-методический аппарат, позволяющий, исходя из поставленных целей и задач проактивного управления ЖЦ СТО, обоснованно выбирать либо синтезировать конкретные модели (ПМК), обеспечивающие эффективное решение данных задач. Благодаря разработанной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов в информатике появился новый математический аппарат, позволяющий повысить обоснованность и качество проектных решений по созданию программно-математического обеспечения информационных систем (в том числе, в рамках разработанной ИАП) и за счет выявления ошибок снизить стоимость его проектирования и эксплуатации.

Практическая значимость разработанных теорий состоит в том, что они получили разнообразную реализацию в виде соответствующего программно-математического и информационного обеспечения информационно-аналитических систем, успешно функционирующих в космонавтике, гражданской авиации, атомной энергетике, промышленном производстве.

Так, на объектах Госкорпорации „Роскосмос“ (космодромы „Плесецк“ и „Восточный“ — для стартового комплекса РН „Рокот“, космодром „Байконур“ — для стартового комплекса РН „Протон“, „Союз“) внедрение информационно-аналитической платформы в систему подготовки и пуска отечественной РКН „Союз-2“ позволило увеличить до 80 % количество аналитически обоснованных принимаемых управленческих решений при подготовке и пуске ракет-носителей. Это достигнуто за счет предварительной систематизации исходных данных и знаний, а также применения многокритериального анализа большего числа альтернативных решений по сравнению с эвристическими подходами [10, 11].

За счет сокращения длительности этапов обработки, анализа и принятия управленческих решений по сравнению с существующими подходами (без снижения их качества) удалось существенно увеличить длительность временного резерва, отводимого на анализ возможных предаварийных, нештатных и аварийных ситуаций и соответствующее восстановление работоспособности узлов и агрегатов РКН „Союз-2“ в реальном масштабе времени в процессе подготовки и пуска. На объектах Госкорпорации „Росатом“ (Смоленская, Ленинградская, Курская АЭС) при эксплуатации единых систем управления защитой ядерных реакторов на атомных электростанциях России было достигнуто 50 %-ное сокращение времени на принятие оперативных решений за счет многовариантного прогнозирования и диагностирования неисправностей системы управления ядерным реактором.

Заключение. Разработка отечественной ИАП и соответствующих информационно-аналитических систем потребовала развития научных основ, включающих в себя две новые прикладные теории: теорию проактивного (упреждающего) управления ЖЦ СТО, а также дополняющую ее теорию многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов, описывающих функционирование СТО и ИАС, в рамках которых осуществляется реализация проактивного управления объектами на различных этапах их ЖЦ. Последнюю теорию авторы назвали квалиметрией моделей и полимодельных комплексов. Данные две теории вносят существенный вклад в развитие современной информатики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия цифровой трансформации ракетно-космической отрасли РФ на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. М.: Гос. корпорация „Роскосмос“, 2019. 33 с.
2. Белов В. С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения: Учеб. пособие. М.: МГУЭСИ, 2005. 111 с.
3. Бурматов С. В. Информационная поддержка жизненного цикла изделий как основа системы менеджмента безопасности авиационной деятельности авиационного комплекса России // Науч. вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 65—70.
4. Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 7—15.
5. Перминов А. Н., Прохорович В. Е., Птушкин А. И. От мониторинга технического состояния ракетно-космической техники к мониторингу ее жизненного цикла // В мире НК. 2004. № 4(26). С. 8—11.
6. PROMISE Consortium. “Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems”: Project Website, 2007 [Электронный ресурс]: <from <http://www.promise.no/>>.
7. Takata S., Kimura F., van Houten F. J. A. M., Westkamper E., Shpitalni M., Ceglarek D., Lee J. Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management // CIRP Annals. 2004. Vol. 53, N 2. P. 643—655.
8. Horvath I., Gerritsen B. H. M. Cyber-Physical Systems: Concepts, technologies and implementation principles // Proc. TMCE. 2012. P. 19—36.
9. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. Ахметов Р. Н., Васильев И. Е., Капитонов В. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовки и пуска ракеты космического назначения „Союз-2“: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 3—54.
11. <https://petrocometa.ru/>

Сведения об авторах

Михаил Юрьевич Охтилев

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

- Павел Алексеевич Охтилев** — канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. научный сотрудник; E-mail: pavel.oxt@mail.ru
- 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
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — д-р техн. наук, чл.-кор. РАН; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; руководитель научного направления СПИИРАН; E-mail: yusupov@iias.spb.su

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. *Strategiya tsifrovoy transformatsii raketno-kosmicheskoy otrasli RF na period do 2025 goda i perspektivu do 2030 goda* (Strategy for Digital Transformation of the Rocket and Space Industry of the Russian Federation for the Period up to 2025 and the Prospect until 2030), Moscow, 2019, 33 p. (in Russ.)
2. Belov V.S. *Informatsionno-analiticheskiye sistemy. Osnovy proyektirovaniya i primeneniya: uchebnoye posobiye, rukovodstvo, praktikum* (Information-Analytical Systems. Design and Application Fundamentals: Tutorial, Guide, Workshop), Moscow, 2005, 111 p. (in Russ.)
3. Burmatov S.V. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2012, no. 178, pp. 65–70. (in Russ.)
4. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 11(57), pp. 7–15. (in Russ.)
5. Perminov A.N., Prokhorovich V.E., Ptushkin A.I. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya* (V mire NK), 2004, no. 4(26), pp. 8–11. (in Russ.)
6. *PROMISE consortium*, Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems, <http://www.promise.no/>.
7. Takata S., Kimura F., van Houten F.J.A.M., Westkamper E., Shpitalni M., Ceglarek D., Lee J. *CIRP Annals*, 2004, no. 2(53), pp. 643–655.
8. Horvath I., Gerritsen B.H.M. *Proceedings of TMCE*, 2012, pp. 19–36.
9. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa sostoyaniya i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring the State and Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
10. Akhmetov R.N., Vasiliev I.E., Kapitonov V.A., Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. *Aerospace Instrument-Making*, 2015, no. 4, pp. 3–54. (in Russ.)
11. <https://petrocometa.ru/>. (in Russ.)

Data on authors

- Mikhail Yu. Okhtilev** — 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 System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: oxt@mail.ru
- Pavel A. Okhtilev** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Junior Researcher; E-mail: pavel.oxt@mail.ru
- 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 System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
- 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 Information Technologies in System Analysis and Modeling; Head of a Scientific Direction of SPIIRAN; E-mail: yusupov@iias.spb.su

Received 18.07.2022; approved after reviewing 28.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.