

УДК 007:51: 681.3

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Соколов Б.В., Юсупов Р.М., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А. (Санкт-Петербург)

Введение

Важнейшая особенность происходящей в настоящее время научно-технической революции состоит в том, что по мере её развития всё большее значение приобретает учёт факторов сложности в ныне существующих и создаваемых людьми изделиях, системах и комплексах [1-5], имеющих материальное, идеальное или комбинированное воплощение. Часто указанные результаты деятельности человека называют сложными объектами (СЛО), в качестве которых могут рассматриваться, например, сложные технические объекты (СТО), сложные организационно-технические объекты (СОТО). Далее под СЛО будем понимать объекты, познание (изучение) которых требует совместного привлечения разнотипных моделей, многих теорий, а в некоторых случаях многих научных дисциплин (организации междисциплинарных исследований). Для того, чтобы отличать простые объекты от сложных вводят в рассмотрение несколько аспектов сложности: структурную сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность развития, сложность моделирования [6-11].

В качестве наиболее характерных примеров СЛО можно привести: системы управления функционированием различных классов транспортных систем (наземных, воздушных, морских, космических и т.п.); территориально-распределённые неоднородные информационно-вычислительные сети, компоненты которых – локальные вычислительные сети – тоже являются СТО; гибкие автоматизированные и автоматические производства различных типов продукции [8-13]. На рис. 1 представлен пример типовой структуры СЛО.

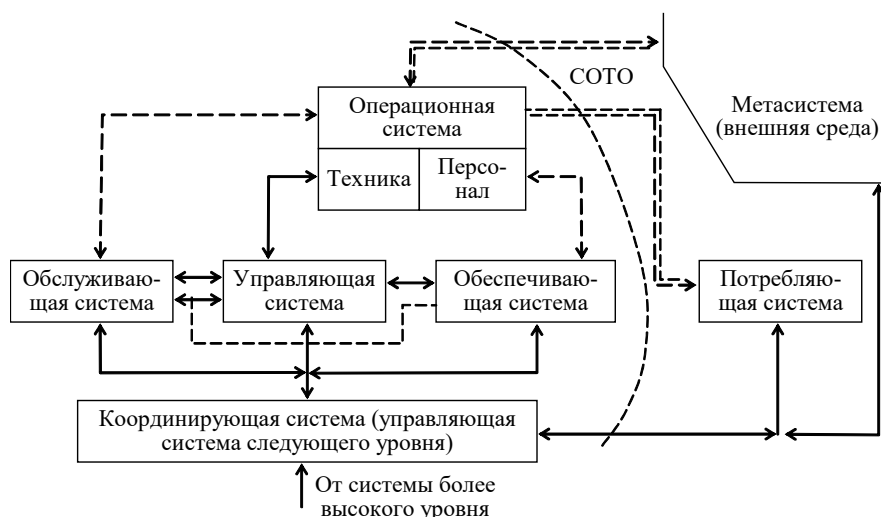


Рис. 1. Пример типовой структуры современного сложного объекта [19]

В целом создание и развитие СЛО (в том числе и СТО) представляет собой многоэтапный процесс, характеризующийся значительными капиталовложениями, длительным сроком внедрения и реализации, а также существенной неопределённостью, связанной с возможными изменениями как целей проектирования

и применения, так и воздействий различного рода возмущений внешней среды на указанные объекты на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ). Используя в дальнейшем понятие ЖЦ будем руководствоваться определением, приведенным в [9], где под **жизненным циклом изделия (объекта)** понималась совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенном изделии до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации изделия.

Понятие жизненного цикла изделия (в том числе СлО и СТО) относится к числу основных в экономике, производстве и потреблении создаваемой в мире продукции (товарах и услугах). На рис. 2 для примера в агрегированном графическом виде представлены типовые этапы и фазы ЖЦ СлО (СТО).

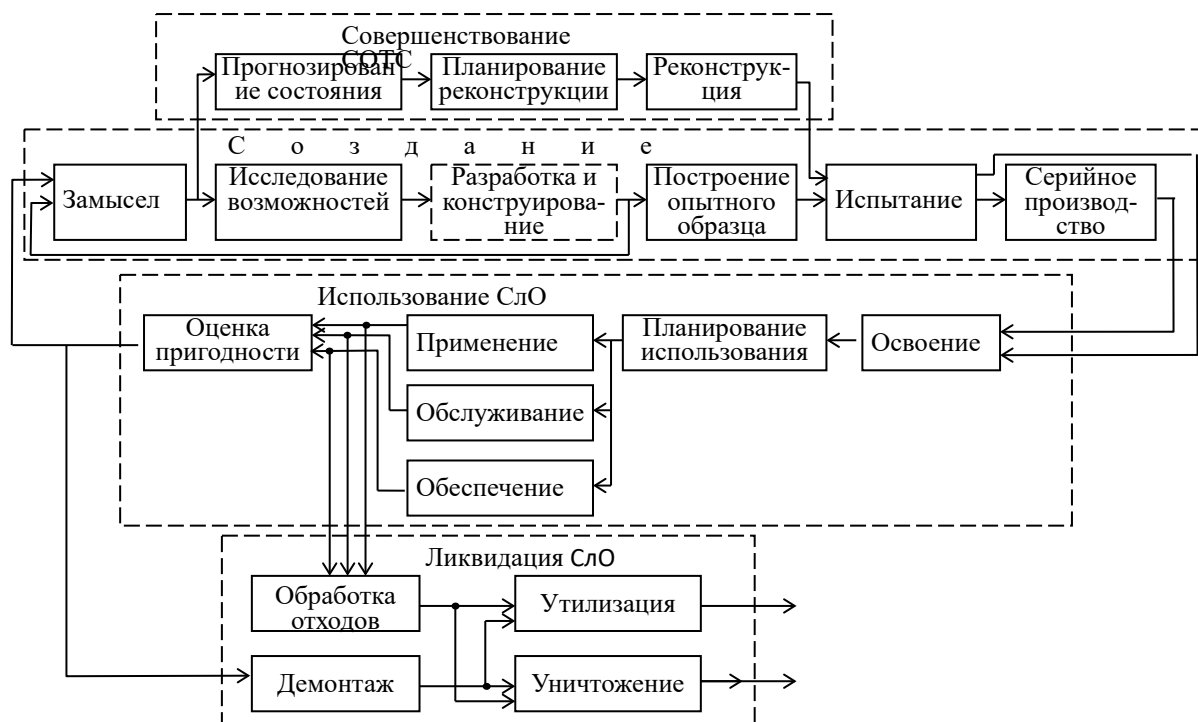


Рис. 2. Этапы и фазы жизненного цикла СлО (СТО) [19]

Проведенный анализ показал, что постоянно расширяющееся с конца XX века многообразие процессов ЖЦ СлО (СТО), вызванное современной научно-технической революцией, а также настоятельная необходимость интенсификации данных процессов в условиях глобализации мировой экономики потребовали активизации информационного взаимодействия объектов и субъектов, участвующих в их поддержке. При этом с ростом числа участников рыночных отношений в указанный период времени существенно возрос объем формируемых, хранимых, передаваемых, обрабатываемых и используемых данных, информации и знаний. Перечисленные факторы привели к необходимости разработки и внедрения в мире различных классов информационных и автоматизированных систем управления (АСУ) объектами и процессами [8-14,15-22].

Осознание отечественными и зарубежными научными школами особой актуальности решения перечисленных ранее проблем создания и внедрения новых поколений систем управления ЖЦ СлО привело к необходимости проведения значительного количества фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований [1-5,10-11,12-14].

При этом неопределенность сценариев развития будущего для таких высокоинерционных объектов, к которым относятся как сами СЛО, так и их СУ, требует перехода от традиционной *концепции реактивного управления* данными объектами к *концепции проактивного управления*.

Далее под *проактивным управлением ЖЦ СЛО* будем понимать, как уже указывалось во введении, 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 СЛО (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 [1,6-8].

Переход к реализации концепции проактивного управления ЖЦ СЛО требует проведения широкомасштабных фундаментальных и прикладных исследований, направленных на разработку, прежде всего, методологических и методических основ организации такого рода управления, в котором должна произойти органичная интеграция концепций и технологий современных теории организационного управления (менеджмента) и неокибернетики [7-8,12].

В качестве примера такого рода исследований можно привести международный проект PROMISE [15,21,22], в котором участвовали 22 организации из Евросоюза, Швейцарии, Японии, Австралии и США. Данный проект был успешно завершен в 2008 году. В результате выполнения этого проекта была предложена более совершенная технология управления ЖЦ, которая получила название CL₂M (Closed Loop Lifecycle Management – управление ЖЦ с обратной связью). Дальнейшим развитием концепций PROMISE и e-maintenance стали многочисленные концептуальные и уже 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, т.к. в условиях большой кооперации и территориальной распределенности исполнителей перспективных программ научно-технического и технологического развития требуется соответствующая перспективная инфокоммуникационная среда.

В качестве примера создания проекта «производственного Интернета» можно привести реализуемую в Германии в настоящее время концепцию Industry 4.0 или, по-другому, 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 тоже задумываются о будущем индустриального производства. Так, например, в 2014 году компании General Electric, AT&T, Cisco, IBM и Intel создали Консорциум промышленного интернета (Industrial Internet Consortium), который сегодня включает уже 170 членов.

В Российской Федерации разработчики отечественной концепции проактивного управления ЖЦ СЛО в качестве стратегической цели (миссии) определили формирование методологии *обеспечение технологической независимости* от зарубежных производителей в области создания, эксплуатации и модернизации модельно-алгоритмического, технического, информационного и программного

обеспечения комплексной автоматизации и интеллектуализации проактивного управления ЖЦ СЛО *на основе принципиально нового подхода* к проектированию и применению соответствующих АСУ СЛО, основанного на комбинированном использовании логических, лингвистических и математических моделей, методов и алгоритмов, обеспечивающих суперкомпьютерную обработку и анализ в реальном времени сверхбольших объемов измерительной информации при наличии в ней некорректных, неточных и противоречивых данных [1-3,5-8]. Для реализации данного подхода в течение более 30 лет разрабатывалась и совершенствовалась отечественная информационно-аналитическая платформа (ИАП), на базе которой были созданы и продолжают создаваться различные конкретные информационно-аналитические системы (ИАС), а в последнее время интеллектуальные информационно-аналитические системы (ИИАС). На рис. 3 представлены общие сведения о созданной отечественной ИАП, а на рис. 4 ее основные отличия от аналогичных отечественных и зарубежных информационных систем, решающих задачи управления жизненным циклом СЛО.



Рис. 3. Обобщенные сведения о созданной отечественной ИАП

1. Методологические и методические основы комплексного моделирования, автоматизации и интеллектуализации проактивного управления жизненным циклом сложных объектов

Для конструктивной реализации на практике новой концепции управления ЖЦ СЛО, а именно концепции проактивного управления данными ЖЦ необходимо было создание, как уже указывалось ранее, соответствующих методологических, методических и технологических основ, в ходе формирования которых авторы данной работы разработали *две новые прикладные теории: теорию проактивного управления ЖЦ СЛО и соответствующими АСУ*, в которых данные управления реализуются, а также *теорию многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов (ПМК)*, описывающих процессы функционирования СЛО и соответствующих АСУ на различных этапах их ЖЦ (в дальнейшем для краткости последнюю теорию будем называть *квалиметрией моделей и ПМК*). Последняя из перечисленных теорий, а именно, прикладная теория многокритериального оценивания качества моделей и полимодельных комплексов для решения задач проактивного управления ЖЦ СЛО, обеспечивает детализацию и уточнение положений, развитых в общей квалиметрии моделей и полимодельных комплексов.

Характеристики	Разработчик. Наименование образцов АС						
	Аскон (Лопман- PLM)	Solid Works- Russia. (SWR- PDM)	Лоция- Софт. Лоция- Софт	IBM. PLM Solu- tion	Team Center- Enginee- ring	ZWCA D 2018 Professi- onal	ФНИ РАН ИАП
Страна	Россия	Россия	Россия	США	ФРГ	Китай	Россия
Защищенное единое информационное пространство	-	-	-	+	+	-	+
Поддержка принятия решений	-	+	+	+	+	-	+
Охват всех этапов жизненного цикла	+	-	-	+	-	-	+
Решение информационно-аналитических задач	-	-	-	-	-	+	+
Решение задач поддержки жизненного цикла	+	-	-	+	+	-	+
Функционирование в реальном времени	-	-	-	-	-	-	+

Рис. 4. Сравнительный анализ ИАС и ИАП, решающих задачи управления ЖЦ СЛО

При этом новизна разработанных теорий состоит в том, что удалось базирясь на сформулированных авторами концепциях управляемой структурной динамики СЛО и инвариантности состояний СЛО и состояний распределенного асинхронного вычислительного процесса, их описывающих, осуществить переход *от эвристических методов алгоритмизации этих процессов к последовательности целенаправленных теоретически и методически обоснованных и взаимосвязанных этапов построения как алгоритмов анализа многоструктурных макро и микросостояний СЛО, так и алгоритмов проактивного управления ими.*

Центральными координирующими моделями в рамках созданного полимодельного комплекса (ПМК) являются иерархические вычислительные G-модели представления знаний, созданные на основе комбинирования математического аппарата сетей Петри с логико-динамическими моделями проактивного программного управления комплексами операций, ресурсами, потоками и структурами [5-8,12,23-26]. На рис.5 показано место предложенных G-моделей среди известных формализмов, используемых в современном искусственном интеллекте (ИИ).



Рис. 5. Базовые модели, используемые в созданной ИАП

Выполненные исследования показали, что в рамках предлагаемой логико-динамической интерпретации процессов проактивного управления ЖЦ СЛО и соответствующего полимодельного комплекса, удастся формально описать и одновременно решить следующий перечень задач создания и применения конкретных ИАС проактивного управления СЛО: задачи проектирования облика модернизируемой/разрабатываемой ИАС (*поиск ответа на вопрос – что и когда надо модернизировать/разрабатывать*); задачи определения срока (*момента времени*), к которому надо завершить модернизацию/разработку; задачи синтеза технологии модернизации/разработки (*поиск ответа на вопрос – в какой последовательности надо проводить модернизацию/разработку*); задачи формирования и реализации плана проведения модернизации/разработки.

При традиционном проектировании указанные задачи из-за большой размерности решаются с использованием последовательно-параллельной пространственно-временной декомпозиции исходной общей задачи структурно-функционального синтеза облика ИАС проактивного управления ЖЦ СЛО 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 предлагаемой динамической интегративно-управленческо-стоимостной интерпретации процессов создания и применения ИАС СЛО, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах современной теории принятия решений, исследований операций, теории систем, теории управления **удалось на конструктивном уровне подойти как к решению всех перечисленных задач структурно-функционального синтеза и управления развитием ИАС СЛО, так и доказательству корректности соответствующих процедур.**

В общем случае обобщенная процедура проактивного управления этапами ЖЦ СЛО (в том числе и АСУ СЛО) включает в себя две основные фазы. **На первой фазе** осуществляется формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний СЛО или, по-другому, структурно-функциональный синтез нового облика СЛО, соответствующего заданному этапу ЖЦ СЛО и складывающейся (прогнозируемой) обстановке. **На второй фазе** проводится выбор конкретного варианта многоструктурного макросостояния СЛО с одновременным

синтезом (построением) проактивных планов (программ) управления переходом СЛО из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие СЛО, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого проактивного управления СЛО в промежуточных многоструктурных макросостояниях. На программном уровне перечисленная обобщенная процедура применительно к различным ИАС получила конкретную реализацию. На рис. 6 представлен пример модельно-алгоритмического описания процесса многокритериального внешнего проектирования СЛО и его АСУ, основанного на последовательном сужении множества проектных альтернатив (в данном случае – обобщенных описаний АСУ орбитальной группировкой (ОГ) космических аппаратов (КА)).

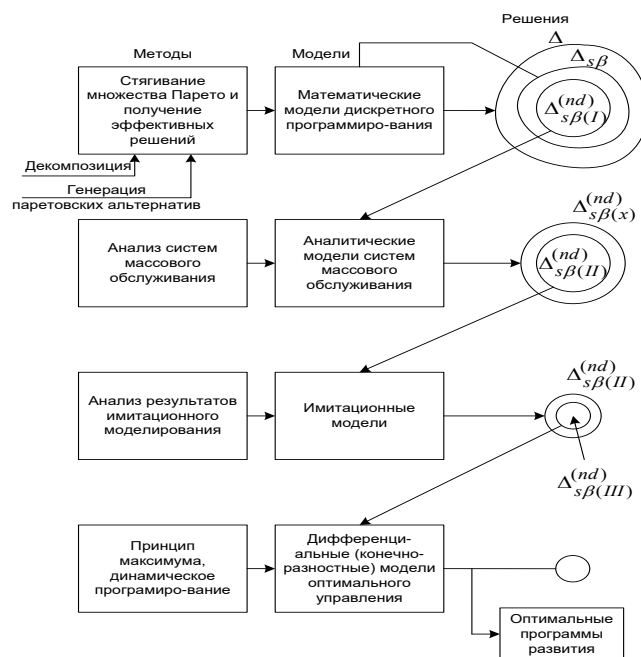


Рис. 6. Стратегия сужения области Парето, описывающей альтернативные варианты создания и применения АСУ ОГ КА

Говоря об автоматизации и интеллектуализации процессов проактивного управления ЖЦ СЛО, следует отметить, что они базируются на методологических и методических основах комплексного моделирования рассматриваемых СЛО, о которых была сказано выше.

При этом основная **научно-техническая идея** предлагаемой автоматизации и интеллектуализации заключается в создании принципиально нового подхода к проектированию и применению единого информационно-аналитического пространства (ЕИАП) проактивного управления ЖЦ СЛО на основе комплексной разработки и использования, во-первых, киберфизических систем (КФС) и их цифровых двойников (ЦД), обеспечивающих соответствующие процессы управления с обратной связью постоянно актуализируемой и обрабатываемой информацией, и, во-вторых, интеллектуальных интерфейсов с элементами визуального программирования, позволяющих различным категориям пользователей на профессиональном языке осуществлять адаптивное взаимодействие с платформой в ходе проактивного управления ЖЦ СЛО. При этом **интеллектуальные интерфейсы** обеспечивают тиражируемость извлекаемых у экспертов знаний о состоянии СЛО для последующего

внедрения их в аналогичные смежные системы на основе использования новых логико-алгебраических и логико-лингвистических моделей, созданных для описания рассматриваемых изделий и базирующихся на постулатах теории искусственного интеллекта, инженерии знаний, теории управления (см. рис. 7). Проактивное же управление ЖЦ СЛО позволяет, в отличие от традиционно реализуемого на практике реактивного управления, заранее предотвращать предпосылки (а не последствия) возникновения нештатных (критических) ситуаций за счет целенаправленно сформированной структурно-функциональной избыточности. Разработанные методология и технологии управления ЖЦ СЛО принципиально отличаются от разрабатываемых за рубежом технологий CL₂M (Closed Loop Lifecycle Management – управление ЖЦ с обратной связью) тем, что они базируются на концепции проактивного (упреждающего) управления.

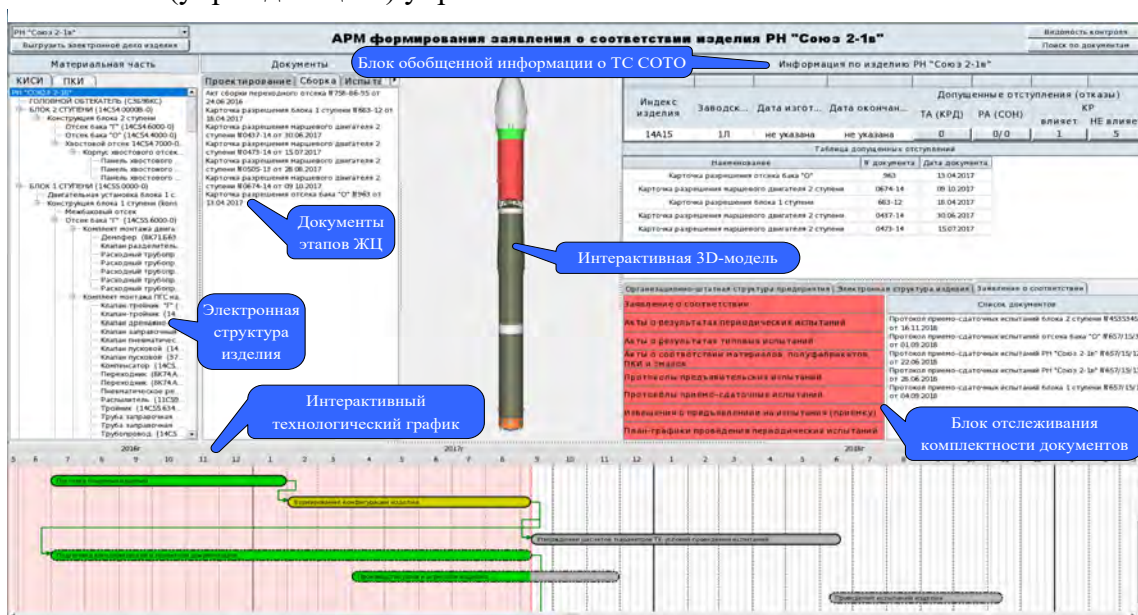


Рис. 7. Пример интеллектуального интерфейса для доступа к информации из электронного паспорта ракеты-носителя «Союз-2»

2. Практическое значение разработанного модельно-алгоритмического обеспечения и соответствующей ИАП

Практическое значение разработанного модельно-алгоритмического обеспечения и соответствующей ИАП состоит в их унифицированности и многофункциональности, позволивших реализовать на практике широкий спектр информационно-аналитических систем, в том числе единый виртуальный электронный паспорт изделий ракетно-космической техники, содержащий согласованную и корректную информацию об их состоянии однозначно воспринимаемую пользователями на всех этапах жизненного цикла. Разработанная отечественная информационно-аналитическая система, обеспечивающая формирование и использование электронного паспорта изделий ракетно-космической техники оперирует не только с традиционными документами и файлами, но и с формализованными, постоянно актуализируемыми с помощью соответствующих киберфизических систем, информационными моделями, содержащими данные, информацию и знания об изделиях и однозначно воспринимаемыми всеми участниками их ЖЦ. Более того, на основе проактивного управления ЖЦ изделий ракетно-космической техники удалось на практике перейти от технологий событийного и плано-предупредительных регламентов и ремонтов к технологиям обслуживания их по фактическому состоянию, определяемому в реальном

масштабе времени на основе информации о состоянии объекта, получаемой с киберфизических систем.

На базе платформы ЕИАП было разработано и организовано серийное производство уникальных мобильных сервисных систем с радиочастотной идентификацией оборудования для обслуживания пассажиров на борту судов гражданской авиации (см. рис.8)

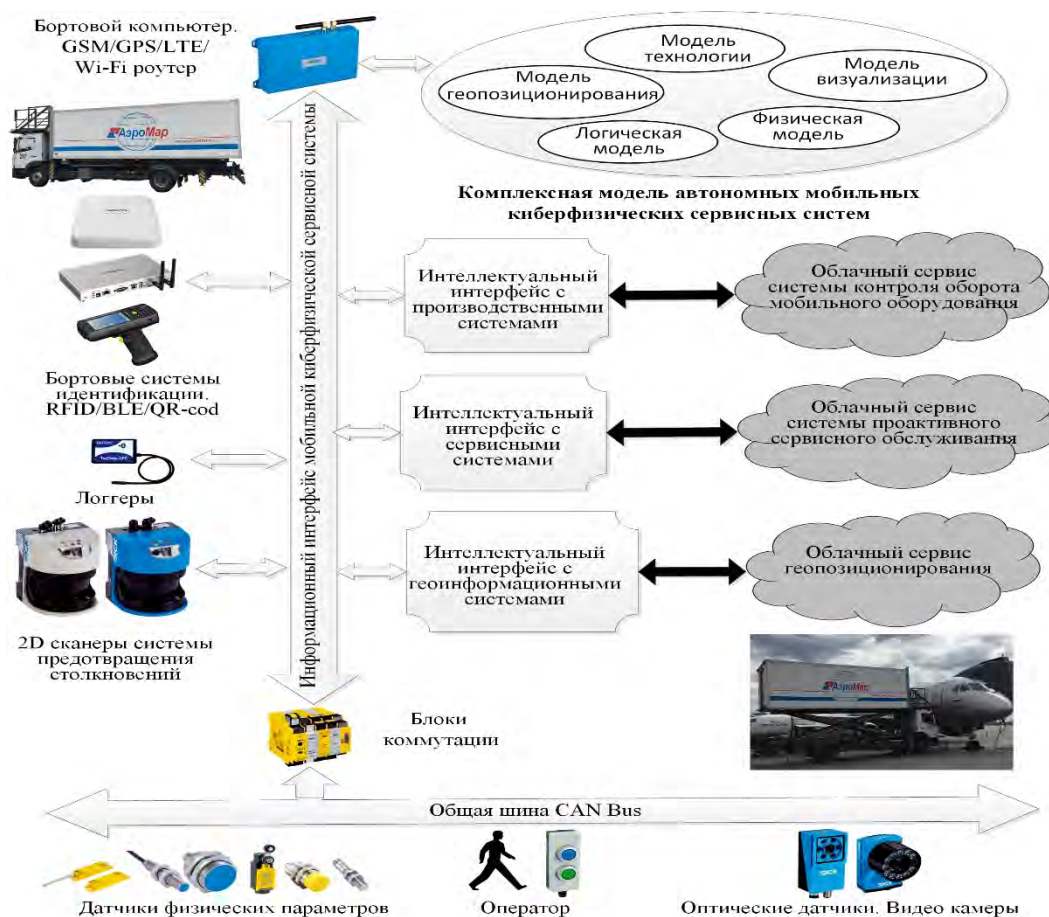


Рис. 8. Архитектура разработанных мобильных киберфизических сервисных систем

Одна из главных особенностей данных систем состоит в том, что они мобильны и автономны. Контроль состояния системы осуществляется с помощью бортового компьютера, получающего данные от различных интеллектуальных сенсоров, датчиков и подсистем. Разработанные киберфизические системы имеют широкий потенциал возможностей: предотвращать столкновение мобильной системы, контролировать точность ее сближения при стыковке с воздушным транспортным судном, безопасность перемещения в опасной зоне аэропорта, идентификации и контроля перемещения мобильного оборудования, используемого для обслуживания пассажиров на борту судов гражданской авиации и другие. Разработанные интеллектуальные интерфейсы позволяют организовать взаимодействие и обмен информацией с внешними информационными системами эксплуатирующих предприятий, служб аэропорта, сервисных служб и т.д.

Достигнутые результаты внедрения. Сокращение на 15-20% времени обработки информации и принятия управленческих решений. Снижение до 30% стоимости и сроков разработки программного обеспечения информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений. Также обеспечивается

повышение степени соответствия разрабатываемого программного обеспечения (ПО) исходным требованиям и постановке задачи, а также достоверности результатов его функционирования на основе формальных спецификаций; потенциальное снижение стоимости, сроков разработки и сложности масштабирования и модифицирования ПО информационно-аналитической поддержки ЖЦ СлО; технологичность и конструктивность процессов извлечения и представления экспертных знаний на основе использования графических нотаций, использования полимодельного и многоязычного описания, комплекса средств верификации.

Сокращение времени обслуживания воздушного судна на 15% за счет применения мобильных киберфизических сервисных систем.

Заключение

В результате выполненного за последние 5 лет комплекса междисциплинарных исследований **решена крупная научно-техническая проблема** обеспечения технологической независимости российских разработчиков от зарубежных производителей в области проектирования, создания, эксплуатации и модернизации модельно-алгоритмического, технического, информационного и программного обеспечения проактивного управления ЖЦ сложных объектов. **Особая актуальность и значимость** решенной проблемы в настоящее время обуславливается жесткими санкциями, которым подвергается РФ в сфере информационно-коммуникационных технологий. Рассматриваемая технологическая независимость обеспечивается за счет создания и широкомасштабного внедрения в различных отраслях экономики РФ отечественной многофункциональной унифицированной единой информационно-аналитической платформы проактивного управления ЖЦ сложных объектов. **Научная новизна представленных результатов** состоит в создании принципиально нового подхода к проектированию и применению проактивного управления ЖЦ СлО на основе комплексной разработки и использования, во-первых, полимодельного описания рассматриваемой предметной области, включающего наряду с традиционными аналитико-имитационными моделями, модели, базирующиеся на логико-алгебраических и логико-лингвистических описаниях и их комбинациях. Во-вторых, на использовании КФС и их ЦД, обеспечивающих соответствующие процессы управления с обратной связью постоянно актуализируемой и обрабатываемой информацией, и интеллектуальных интерфейсов с элементами визуального программирования, позволяющих различным категориям пользователей на профессиональном языке осуществлять адаптивное взаимодействие с платформой в ходе проактивного управления ЖЦ СлО.

Разработанные **научные основы**, позволившие решить сформулированную проблему, включают в себя две разработанные авторами доклада прикладные теории. Это теория проактивного управления ЖЦ СлО, а также дополняющей ее теории многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов, описывающих функционирование СлО и соответствующих информационно-аналитических систем, в рамках которых осуществляется реализация проактивного управления СлО на различных этапах их ЖЦ [5-8,12].

На основе данных теорий в ФИЦ РАН (СПИИРАН) в кооперации с НИО ЦИТ «Петрокомета», АО «Аэромар», ЗАО «Универсал Аэро» были разработаны новые интеллектуальные технологии и программные комплексы сбора, интеграции, интерпретации, визуализации данных и знаний, реализованные как единая отечественная информационно-аналитическая платформа проактивного управления ЖЦ СлО. Результаты выполненной работы представлены в виде проектной документации на

созданные и успешно функционирующие в различных отраслях экономики РФ информационно-аналитические системы и подтверждаются 15 патентами РФ на изобретения, 10 свидетельствами о регистрации программ. **Практическая значимость** предложенных интеллектуальных информационных технологий и информационно-аналитической платформы проактивного управления ЖЦ Сло была подтверждена при выполнении ряда опытно-конструкторских работ и научно-исследовательских работ, связанных с созданием и вводом в эксплуатацию авиационных и ракетно-космических изделий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Литература

1. **Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В.** Теоретические основы проактивного управления сложными объектами // Известия ВУЗОВ. Приборостроение. – 2014. – Т.57. №11. – С. 7-15.
2. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Юсупов Р.М., Стыскин М.М., Джао В.Ю-Д.** Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Том: 63. № 2. – С. 158-163.
3. **Ронжин А.Л., Соколов Б.В., Джао В.Ю-Д., Миронова Е.Г., Стыскин М.М.** Применение технологии радиочастотной идентификации для построения системы контроля оборота бортового кухонного оборудования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2020. – вып. 1. – С. 3-10.
4. **Бирбаер Р.** Что отразит цифровое зеркало // Умное производство. – 2019. – №1(45). – С. 8-13.
5. **Охтилев М.Ю.** Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 1999. – 160 с.
6. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория и системы управления. – 2004. – №6. – С.5–16.
7. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
8. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
9. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы.
10. **Кульга К.С.** Особенности внедрения на предприятиях и методы интеграции CAD/CAM/PDM/FRP/MRP/MES/PLM и ERP-систем // САПР и графика. – 2008. – №3. – С.91–94.
11. **Колчин А.Ф., Овсянников М. В., Стрекалов А. Ф. и др.** Управление жизненным циклом продукции. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.
12. <http://litsam.ru>
13. **Судов Е.В.** Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели / Е. В. Судов. – Москва : ООО Издательский дом "МВМ", 2003. – 264 с. – ISBN 5-98136-019-4. – EDN YNEAXL.

14. **Стародубов В.А.** Управление жизненным циклом изделий, от концепции до реализации. – СПб.: ЗАО «Стерлинг Групп СПб», 2006. – 120с.
15. Life-Cycle Management: State of the art theory and practice // International Journal of life cycle assessment. – v.7, № 6. – 2002.
16. **Черняк Л.** От адаптивной инфраструктуры к адаптивному предприятию // Открытие системы. – 2003. – № 10. – С.32-39.
17. **Брук П.А.** Управление жизненным циклом изделия в судостроении. Система PLM Teamcenter Enterprise компании EDS // Судостроение. – Спб., 2002. – № 6.
18. **Стародубов В.А.** Сила и слабость PLM//CAD/CAM/CAE Observer. – Рига, 2005. – № 1.
19. <http://www.plm10.org>
20. Концепция развития ИПП-технологий в промышленности России. – ВИМИ, 2002.
21. Product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems <http://www.promise.no/>.
22. **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, no2. – pp. 643-655.
23. **Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Охтилев М.Ю.** Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – 2015. – №1(162). – С.162-174.
24. **Охтилев М.Ю., Чуприков А.Ю. и др.** Перспективные направления развития информационных технологий мониторинга состояний сложных технических объектов в реальном масштабе времени // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 11. – С. 50-59.
25. **Резников Б.А.** Системный анализ и методы системотехники. – МО СССР, 1990. – 522 с.
26. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №5. – С. 24-41.
27. **Герасименко В.А.** Информатика и интеграция в технике, науке и познании // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 05. – С. 22-42.