

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Д.Н. Верзилин, М.Ю. Охтилев, П.А. Охтилев, Б.В. Соколов,  
Р.М. Юсупов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский Центр РАН  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39

E-mail: modusponens@mail.ru, oxt@mail.ru, pavel.oxt@mail.ru, sokolov\_boris@inbox.ru,  
yusupov@iias.spb.su

**Ключевые слова:** сложный технический объект, жизненный цикл, проактивное управление структурной динамикой, информационно-аналитическая системы и платформа, квалиметрия моделей и полимодельных комплексов.

**Аннотация:** В настоящее время из-за высокой сложности как самих объектов проектирования (в качестве которых в статье рассматриваются сложные технические объекты (СТО)), так и неопределенности условий реализации их жизненного цикла (ЖЦ), требуется переход от моделей, методов и технологий реактивного управления ЖЦ СТО к методологии и технологиям проактивного (упреждающего) управления. Для реализации на практике данной методологии и технологий созданы все необходимые условия (киберфизические системы, RFID и мобильные технологии, интеллектуальные интерфейсы), обеспечивающие новый уровень описания и использования базового кибернетического принципа обратной связи. Однако, к сожалению, в настоящее время отсутствуют теоретические основы проактивного (упреждающего) управления ЖЦ СТО. В связи с этим в статье в обобщенном виде описываются полученные авторами научные и практические результаты в рассматриваемой сфере. Разработанная методология и технологии ПрУ ЖЦ СТО, принципиально отличаются от разрабатываемых за рубежом технологий CL2M (Closed Loop Lifecycle Management – управление ЖЦ с обратной связью) тем, что они базируются на разработанной авторами прикладной теории ПрУ структурной динамикой сложных объектов, которая распространена и на предметную область ЖЦ СТО.

## 1. Введение

Осознание отечественными и зарубежными научными школами особой актуальности решения существующих проблем создания и внедрения новых поколений систем управления (СУ) жизненным циклом (ЖЦ) сложных технических объектов (СТО) привело к необходимости проведения в последнее время значительного количества фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований в данной сфере [1-4]. При этом неопределенность сценариев развития будущего для таких высоко инерционных объектов, к которым относятся как сами СТО, так и их СУ, требует перехода от традиционной *концепции реактивного управления* данными объектами к *концепции ПрУ*. Далее под *проактивным управлением* (ПрУ) ЖЦ СТО будем понимать такой *целенаправленный многоэтапный многофункциональный процесс*, который в отличие от традиционно используемого *реактивного управления*, основанном 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 СУ принципиально новых многовариантных 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 (многокритериальный синтез) структурно-функциональных резервов [5-9]. Именно данный тип избыточности обеспечивает максимальную гибкость поведения СТО в условиях неопределенного будущего. При этом за счет высокой степени унификации технических средств современных и перспективных СТО рассматриваемая структурно-функциональная избыточность реализуется, чаще всего, с использованием их модельно-алгоритмического и программно-информационного обеспечения.

Переход к реализации концепции ПрУ ЖЦ СТО 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 [5-6,9]. В качестве примера такого рода исследований можно привести международный проект PROMISE [3], в котором участвовали 22 организации из Евросоюза, Швейцарии, Японии, Австралии и США. В результате выполнения этого проекта была предложена более совершенная по сравнению с существующей PLM-технологии управления ЖЦ, которая получила название CL<sub>2</sub>M (Closed Loop Lifecycle Management – управление ЖЦ с обратной связью). 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), включающая в себя применение (использование), техническое обслуживание и различные услуги, в том числе, ремонт; - конечная (End of life – EOL), 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, передача (продажа) для использования по новому назначению или для уничтожения.

В выполненном проекте PROMISE было сфокусировано внимание на полном ЖЦ, но наибольший акцент сделан на необходимости обеспечения обратной связи двух последних фаз (MOL и EOL) с первой фазой – BOL. Это вызвано следующими обстоятельствами: – обмен информацией между этапами, входящими в состав BOL – проектированием и производством – осуществляется достаточно эффективно, благодаря таким интеллектуальным информационным системам как CAD/CAM. Системы PDM и Knowledge Management (KM – управления знаниями) также эффективно используются предприятиями промышленности и поставщиками; - поток информации между BOL, MOL и EOL гораздо слабее. Основным результатом проекта PROMISE, в конечном счете, заключается в разработке методологии замыкания информационных потоков о состоянии изделий на этапах MOL и EOL на разработчиков и изготовителей. Прерывание потока данных и информации об изделии прежде, чем оно закончит свой ЖЦ, не позволяло ранее использовать профессиональные опыт и знания специалистов по техническому обслуживанию, ремонту и рециклингу (повторному использованию материалов) при проектировании и производстве. Целевая ориентация новой концепции CL<sub>2</sub>M – обеспечение принятия управленческих решений в течение ЖЦ изделия на основе знаний. Методология CL<sub>2</sub>M

расширяет область применения PLM до КМ, т.е. до управления не только техническими изделиями, но и, любыми искусственными объектами, в том числе и организационными, например, такими как промышленность, здравоохранение, цепи поставок, технологии изготовления лекарств, продуктов питания и другими объектами.

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. В РФ разработчики отечественной концепции ПрУ ЖЦ СТО 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 ПрУ ЖЦ СТО **на основе принципиально нового подхода** к проектированию и применению соответствующих информационно-аналитических систем (ИАС) поддержки принятия управленческих решений на различных этапах ЖЦ СТО, 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 [5, 6, 9].

## 2. Научные основы разработанной методологии проактивного управления жизненным циклом СТО

Для конструктивной реализации на практике новой концепции управления ЖЦ СТО, а именно концепции ПрУ необходимо создание соответствующих методологических, методических и технологических основ, в ходе формирования которых авторы статьи разработали новую методологию решения проблемы ПрУ ЖЦ СТО, включающую 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 (ПМК)**, описывающих функционирование СТО и соответствующих ИАС, в рамках которых осуществляется реализация ПрУ СТО на различных этапах их ЖЦ. Последнюю теорию авторы назвали **квалиметрией моделей и полимодельных комплексов**. Данные две теории вносят существенный вклад в развитие **современной информатики**. Вклад теории ПрУ ЖЦ СТО состоит в том, что благодаря ей современная информатика на конструктивном уровне обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным **в классической кибернетике**. В таблице 1 в левом столбце представлены известные результаты классической кибернетики, которые до последнего времени не использовались в информатике. В правом столбце данной таблицы представлены результаты авторов, которые они привнесли в информатику в ходе создания единой отечественной информационно-аналитической платформы (ИАП) и соответствующих конкретных ИАС, обеспечивающих ПрУ ЖЦ СТО [5-9].

Выполненные исследования показали, что в рамках предлагаемой новой методологии ПрУ ЖЦ СТО и соответствующего методического аппарата, удалось **формально описать и одновременно решить** следующий перечень задач разработки и внедрения ПрУ ЖЦ СТО: **задачи проектирования облика** разрабатываемой / модернизируемого СТО и соответствующей ИАС (поиск ответа на вопрос — что и

когда надо разрабатывать / модернизировать); **задачи определения срока** (момента времени), к которому надо завершить разработку / модернизацию; **задачи синтеза технологии** разработки / модернизации (поиск ответа на вопрос — в какой последовательности надо проводить разработку / модернизацию); **задачи формирования и реализации плана** проведения разработки / модернизации (поиск ответа на вопрос — в какие конкретные моменты времени, какие работы (операции), на каких ресурсах надо выполнять и что делать в случае возникновения расчетных и нерасчетных ситуаций при выполнении производственных планов и планов модернизации оборудования). При традиционном проектировании процессов модернизации СТО (в т.ч. ИАС) указанные задачи из-за большой размерности, нестационарности, нелинейности, неопределенности решаются с использованием последовательно-параллельной пространственно-временной декомпозиции исходной общей задачи структурно-функционального синтеза облика ПрУ ЖЦ СТО без оценивания погрешностей, вызванных использованием соответствующих эвристик и процедур декомпозиции.

**Таблица 1.** Заголовок таблицы печатается нежирным шрифтом размером 10 пунктов и при необходимости может быть продолжен на следующей строке с выравниванием по левому и правому краям области печати заголовка.

№	Теория ПрУ жизненным циклом СТО	
	Фундаментальные научные результаты, полученные в классической кибернетике	Новые научные результаты, которые привносятся авторами в современную информатику
1	Условия управляемости, достижимости и наблюдаемости в задачах управления динамическими системами	Модели, методы, алгоритмы решения задач проверки реализуемости технологии и комплексных планов ПрУ материальными и информационными процессами в СТО (в т.ч. выявление основных факторов (ограничений), влияющих на показатели, оценивающих эффективность ПрУ ЖЦ СТО)
2	Условие существования и единственности оптимального управления динамическими системами	Модели, методы, алгоритмы решения задач оценивания возможности получения оптимальных решений в задачах синтеза технологии и комплексных планов ПрУ материальными и информационными процессами в СТО (в т.ч. в промышленном Интернете)
3	Необходимые и достаточные условия оптимальности в задачах управления динамическими системами	Модели, методы, алгоритмы решения задач формирования структуры технологии и комплексных планов ПрУ материальными и информационными процессами в СТО (в т.ч. в промышленном Интернете)
4	Методы и алгоритмы решения задач оптимального управления динамическими системами	Модели, методы, алгоритмы решения задач автоматизации комплексного планирования (на уровне автоматизированных систем управления предприятием, производственными и технологическими процессами, проектирования производства), мониторинга, оперативного управления, координации материальных и информационных процессов в СТО (в т.ч. в промышленном Интернете).
5	Условия устойчивости и чувствительности в задачах управления динамическими системами	Модели, методы, алгоритмы решения задач оценивания устойчивости (чувствительности) синтезированных технологии и комплексных планов ПрУ материальными и информационными процессами в СТО (в т.ч. в промышленном Интернете) к возможным возмущающим воздействиям, к изменению состава и структуры исходных данных

В этом случае **важнейшие вопросы доказательства полноты, замкнутости и непротиворечивости** предлагаемых проектных решений остаются открытыми. В

рамках предлагаемой авторами *новой системно-кибернетической интерпретации* процессов создания и применения СТО, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах классической кибернетики и современной теории управления удалось на конструктивном уровне подойти как к решению всех перечисленных задач структурно-функционального синтеза и управления развитием СТО, так и доказательству корректности соответствующих процедур [5, 6, 9]. Переход от традиционных к предлагаемым проектным решениям, базирующимся не на эвристиках, а фундаментальных научных результатах позволил на практике существенно повысить оперативность, обоснованность и в целом эффективность принятия решений на различных этапах ЖЦ СТО за счет их новой системно-кибернетической интерпретации, многокритериального оценивания и выбора соответствующих наилучших управляющих воздействий.

Вторая из разработанных авторами теорий – *квалиметрия моделей и ПМК*, описывающих проактивного управляемую структурную динамику СТО, предоставляет разработчикам, исследователям и эксплуатационникам новый научно-методический аппарат, позволяющий им, исходя из поставленных целей и задач ПрУ ЖЦ СТО, обоснованно выбирать, либо синтезировать конкретные модели (ПМК), обеспечивающие эффективное решение данных задач. Квалиметрию моделей и ПМК можно рассматривать как теоретическую базу интенсивно развиваемых в настоящее время технологий создания и использования цифровых двойников, реально существующих СТО [6].

Благодаря данной теории *в информатике* появился новый математический аппарат, позволяющий повысить обоснованность и качество проектных решений по созданию программно-математического обеспечения информационных систем (в том числе и в рамках разработанной ИАП и соответствующих ИАС), снизить стоимость проектирования и эксплуатации за счёт выявления ошибок в программно-математическом обеспечении на всех стадиях его жизненного цикла.

### 3. Заключение

Предложенные авторами доклада прикладная теория проактивного управления ЖЦ СТО и теория многокритериального оценивания и выбора наиболее предпочтительных моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих функционирование СТО и соответствующих ИАС, в рамках которых осуществляется реализация ПрУ СТО на различных этапах их ЖЦ вносят существенный вклад в развитие информатики за счет обогащения ее фундаментальными научными результатами классической и современной теории управления. На основе данных научных результатов в течение последних 10 лет была разработана отечественная многофункциональная унифицированная информационно-аналитическая платформа (ИАП) и соответствующие конкретные ИАС получившие широкомасштабное внедрение в авиакосмической, атомной промышленности и других отраслях экономики РФ.

Научная и практическая значимость полученных результатов отмечена премией Правительства РФ в области науки и техники за 2022 г.

Исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

### Список литературы

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое / Научн. ред. А. Боровиков. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
2. Концепция развития ИПИ-технологий в промышленности России. М.: ВИМИ, 2002.

3. Product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. <http://www.promise.no/>.
4. 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. Т. 63, № 2. С. 158-163.
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. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
7. Буряк Ю. И., Желтов С.Ю., RFID на службу сервиса авиатехники // Логистика. 2006. № 1(34). С. 22-23.
8. Зорин В. А., Баурова Н.И., Степанов П.В. Стыскин М.М., Трегубов П.Г. Система распознавания и мониторинга технического состояния наземных транспортно-технологических машин // Технология металлов. 2021. № 55.
9. <http://litsam.ru> (дата обращения 28.12.2023).