

**G. A. Rzevski**, проф., e-mail: rzevski@gmail.com, The Open University, Milton Keynes, UK,  
**J. Knezevic**, профессор, MIRCE Academy, Exeter, UK,

**П. О. Скобелев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: petr.skobelev@gmail.com,

**Н. М. Боргест**, канд. техн. наук, доц., e-mail: borgest@yandex.ru,

**Е. В. Симонова**, канд. техн. наук, доц., e-mail: simonova.elena.v@gmail.com,  
 Самарский государственный аэрокосмический университет,

**О. И. Лакхин**, руководитель направления, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru, НПК "Разумные решения"

## Новый подход к управлению жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности с использованием теории сложности\*

*Описывается новый подход к управлению жизненным циклом изделий (ЖЦИ) аэрокосмической промышленности на основе теории сложности. Предлагается новая система управления жизненным циклом — Сервис управления ЖЦИ, разработанный как адаптивная сеть вычислительных услуг, основанный на мультиагентной технологии с использованием онтологии. Разработана концепция Сервиса управления ЖЦИ как системы, обладающей необходимым уровнем детализации и сложности для управления другой сложной системой. Продемонстрированы преимущества предлагаемого подхода на примере сложных изделий аэрокосмической промышленности. Выделены основные компоненты архитектуры Сервиса управления ЖЦИ и описан механизм их взаимодействия, обосновано решение использовать онтологии для описания концептуальных знаний, необходимых для управления всем жизненным циклом, и мультиагентного подхода для построения сети взаимосвязанных сервисов, каждый из которых отвечает за определенную функцию процесса управления жизненным циклом изделия. Разработана архитектура адаптивного Сервиса управления ЖЦИ аэрокосмической промышленности. Показано, что новое решение задачи управления жизненным циклом с использованием Сервиса управления ЖЦИ обеспечивает согласованное распределенное принятие решения с возможностью его пересмотра в режиме реального времени при возникновении непредвиденных событий, увеличение производительности и надежности, снижение затрат на всех этапах жизненного цикла изделий аэрокосмической промышленности.*

**Ключевые слова:** жизненный цикл изделия, управление жизненным циклом, Сервис управления жизненным циклом изделия, поддержка принятия решений, адаптивное управление, мультиагентная технология, онтология

### Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) крупных изделий аэрокосмической промышленности, таких как пассажирские и военные самолеты, ракеты, большие спутники или рой малых спутников, состоит из огромного числа взаимосвязанных процессов, распределяемых обычно по нескольким этапам: проектирование, производство, эксплуатация и утилизация. Мы полагаем, что каждый этап ЖЦ состоит из ряда процессов, описанных ниже.

*Этап проектирования* включает исследование рынка, составление технического задания, разработку общей концепции изделия, управление проектированием, разработку обобщенной конструкции, включая рабочие характеристики, безопасность, надежность, эксплуатационную пригодность, промышленное производство, сборку, техническое обслуживание, ремонт и утилизацию, а также проектирование (или подбор) комплектующих.

*Этап промышленного производства* включает выбор и разработку технологий производства, планирование производства и управление им, поставку материалов и комплектующих, изготовление, сборку (на Земле или в космосе), тестирование и обеспечение качества.

*Этап эксплуатации* включает планирование и управление эксплуатацией изделий аэрокосмической

промышленности и работой экипажа внутри флота воздушных судов; планирование и управление ресурсами для технического обслуживания и ремонта; приобретение, хранение и поставку запасных частей.

*Этап вывода из эксплуатации* предусматривает безопасную утилизацию и переработку компонентов и/или материалов.

На сегодняшний день принято считать, что каждый этап ЖЦ управляется отдельной командой специалистов, причем взаимодействие между ними весьма ограничено. Как правило, отсутствует центральная команда управления ЖЦ, ответственная за координацию всех процессов — от разработки общей идеи будущего продукта до его утилизации и переработки. Более того, каждый этап ЖЦ обычно поддерживается автономными компьютерными системами, такими как системы автоматизированного проектирования (CAD), системы автоматизированной разработки (CAE), системы автоматизированного производства (CAM), системы планирования ресурсов предприятия (ERP), а также другими производственными и логистическими планировщиками. Подобные системы редко могут быть в полной мере совместимы друг с другом и никогда не объединяются в единую систему управления ЖЦ.

Такое разделение процессов на отдельные этапы ЖЦ и управление каждым этапом с помощью разных систем, поддерживаемых автономными компьютерными программами, ослабляет важные связи между ключевыми процессами ЖЦ и задерживает полезные информационные потоки, в частности,

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

обратную связь в виде комментариев и пожеланий от участников производства, сборки, эксплуатации и технической поддержки к проектировщикам. Как следствие, у проектировщиков нет доступа в реальном времени к данным по анализу отказов, которые могли бы им помочь лучше понять взаимосвязь между неисправностями и проектными решениями.

Статистика показателей безопасности в аэрокосмической отрасли ведется отлично. Наша задача — определить те области, в которых стоимость ЖЦ может быть значительно сокращена путем улучшения управления сложностью ЖЦ, и при этом сохранить или даже улучшить существующие уровни безопасности.

### **1. Проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности с позиций теории сложности**

Рассмотрим ЖЦ двух изделия аэрокосмической промышленности: крупного воздушного судна и космической станции.

#### **1.1. Жизненный цикл крупного воздушного судна**

В ходе анализа отказов, проведенного в работах [1, 2], были установлены следующие факты:

1. Каждое воздушное судно имеет свой уникальный журнал отказов, который зависит от того, как оно эксплуатировалось и обслуживалось. Условия эксплуатации здесь играют важнейшую роль: самолет, который часто летает в страны Ближнего Востока, будет подвержен отказам из-за наличия песка и высоких температур окружающей среды, в то время как самолет, летающий в северные страны, будет страдать от других видов отказов, возникающих из-за низких температур, снега и льда.

2. Отказы в работе воздушных судов являются взаимозависимыми; выход из строя одного компонента может вызвать сбой других в зависимости, прежде всего, от близкого расположения, а также от функциональных связей. Типичный пример — гидравлическая система, в которой все оперативные и резервные компоненты находятся рядом друг с другом, что иногда приводит к сбою всех компонентов одновременно в результате единственного внешнего события.

3. Моменты возникновения отказов компонентов являются непредсказуемыми, но не случайными, определенные закономерности могут быть обнаружены на основе данных об отказах. Подобные журналы отказов не являются постоянными, они меняются по мере того, как меняются условия эксплуатации воздушного судна, а также в зависимости от срока службы самолета.

Эти выводы ясно показывают, что используемые в настоящее время методы оценки эксплуатационной надежности могут быть значительно улучшены.

Возникают следующие вопросы:

- если каждый отдельно взятый самолет имеет уникальный ЖЦ, правильно ли будет оценивать надежность и организовывать одинаковое обслуживание для всех самолетов с такой же конструкцией?
- если отказы являются взаимозависимыми, правильно ли будет рассчитывать частоту отказов,

игнорируя при этом пространственную взаимозависимость?

- если шаблон отказов изменяется во времени, имеет ли смысл прописывать процедуры технического обслуживания на весь срок службы самолета?

Реализуемые в настоящее время решения проблем, поставленных выше, неэффективны и расточительны, но, тем не менее, приняты из-за высокой сложности ЖЦ крупных изделий аэрокосмической отрасли, так как в настоящее время ни один человек или команда специалистов не способны осмыслить взаимодействия между множествами разнообразных элементов ЖЦ, не говоря уже об управлении ими.

Проиллюстрируем сложность ЖЦ самолета, взяв в качестве примера лайнер В747, один из крупнейших в мире самолетов, который начал выполнять полеты в 1970 г. и был с тех пор продан 170 авиакомпаниям. В747 состоит из 6 млн деталей, из которых 3 млн — это заклепки. Самолет имеет от 5000 до 6000 модулей, играющих важную роль для безопасности, надежности и технического обслуживания. Их необходимо регулярно проверять, тестировать, калибровать, чистить, ремонтировать или менять. Для того чтобы обеспечить безопасность одного летного часа, требуется 12 человеко-часов технического обслуживания (для сравнения: на каждый час полета сверхзвукового самолета Конкорд требовалось 137 человеко-часов).

Следующие данные были взяты из журнала технического обслуживания самого первого самолета Boeing 747 авиакомпании Pan American Airways с бортовым номером N747PA, который начал полеты в 1970 г. Статистика по эксплуатации и основным процедурам технического обслуживания, собранная за 22 года службы этого самолета, приведена ниже:

- потребил более 271 миллионов галлонов топлива;
- налетал 37 млн миль;
- перевез 4 млн пассажиров;
- находился в воздухе 80 000 ч;
- совершил 40 000 взлетов и посадок;
- использовал 2100 шин;
- израсходовал 350 тормозных систем;
- на него было установлено более 125 двигателей;
- на него было потрачено 806 000 человеко-часов технического обслуживания;
- металлическая обшивка на верхней и нижней частях фюзеляжа, а также на крыльях была заменена 5 раз;
- для осмотра конструкции и обнаружения усталости металла и коррозии было использовано 9980 кадров рентгеновских снимков;
- пассажирский салон и туалеты были заменены 4 раза;
- на каждый капитальный ремонт требовалось 50 000 человеко-часов работы.

Самолеты более новых поколений имеют меньшее число деталей, главным образом, за счет использования композитных материалов, и, соответственно, более длительные интервалы основного обслуживания. Так называемые заводские формы технического обслуживания и ремонта (НМВ —

Heavy Maintenance Visit) для недавно спроектированных самолетов выполняются каждые 10 лет вместо 5 лет для самолетов, сконструированных в 1970-х годах. Тем не менее, основное техническое обслуживание, по-прежнему, обходится примерно в 1 млн долларов, причем самолет в это время не пригоден к эксплуатации в течение 1...2 месяцев. Наше исследование показывает, что есть значительные возможности для дальнейшего снижения стоимости ЖЦ.

Важно отметить, что сложность ЖУ воздушных судов возрастает со временем.

Ниже перечислены факторы, приводящие к увеличению сложности ЖЦ:

1. Недавнее резкое увеличение сложности мирового рынка, основанного на использовании сети интернет, что делает прогнозирование спроса и предложения воздушного транспорта ненадежным.

2. Жесткая конкуренция между производителями воздушных судов и двигателей требует постоянного внедрения инноваций в целях производства улучшенных топливосберегающих самолетов, способных обеспечить более комфортабельные и эффективные перевозки с точки зрения затрат, и одновременного сокращения времени выполнения заказа (с момента разработки концепции до выхода продукта на рынок).

Более короткие сроки разработки нового продукта оказывают значительное давление на проектировщиков и производителей из-за появляющегося требования к повышению скорости принятия решений. В свою очередь, подобные требования в сочетании с неустойчивостью спроса и предложения являются вескими аргументами для развития более совершенных систем поддержки принятия решений.

### **1.2. Жизненный цикл Международной космической станции**

В качестве типичного примера рассмотрим Международную космическую станцию (МКС), которая, конечно же, много больше, чем любое воздушное судно. МКС по размеру примерно равна футбольному полю. Но при этом герметичное закрытое помещение внутри нее в настоящее время соизмеримо по размеру с самолетом B747. МКС может быть описана как крупный спутник, совершающий оборот вокруг Земного шара по орбите за 90 мин. Ее можно видеть с Земли как четвертый по яркости объект на небе.

Неотъемлемые составные части МКС — это наземные станции, осуществляющие управление и поддержку МКС, а также запускаемые миссии, доставляющие людей и грузы.

ЖЦ МКС отличается от ЖЦ самолета по нескольким аспектам:

- МКС проектируется, производится и собирается в космосе поэтапно, модуль за модулем;
- этап эксплуатации включает в себя доставку астронавтов и грузов и удаление отходов с помощью ракет, которые выполняют стыковку и отстыковку по мере возникновения необходимости, а также обслуживание станции как удаленно с Земли, так и астронавтами в космосе.

Независимо от этих отличий возможные сферы значительных улучшений в управлении ЖЦ одинаковы или сходны с теми, которые были указаны выше для воздушных судов.

### **1.3. Понятие сложности**

Рассмотрим теперь управление ЖЦ крупных изделий аэрокосмической промышленности сквозь призму теории сложных систем [3—7], которая, несмотря на свою новизну, уже достигла достаточного уровня зрелости, чтобы предоставить столь необходимую в данном вопросе помощь.

Сложность является свойством открытой системы, которая состоит из большого числа разнообразных, частично автономных, активно взаимодействующих элементов, называемых агентами. Сложная система не имеет централизованного управления, а ее поведение определяется взаимодействием агентов, и поэтому, не будучи хаотичным, является неопределенным, но не случайным.

Данное определение понятия сложности идеально подходит для ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности, в котором тысячи инженеров и управленцев на этапах проектирования и производства, а также десятки тысяч сотрудников службы эксплуатации и поддержки с разными навыками и разной степенью автономности взаимодействуют друг с другом без централизованного управления. Кроме того, в течение ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности необходимо предусмотреть, а затем произвести, поставить, собрать и протестировать миллионы компонентов, характеризующихся различными ЖЦ и подвергающихся различным условиям отказов. Все это разнообразие компонентов эксплуатируется в разных условиях и обслуживается в различных географических точках тысячами инженеров и технологов. Каждый из этих людей обладает определенным уровнем навыков, многие из них относятся к разным культурам. Более того, рабочим языком в регулировании всех задач и процессов выступает английский, который не является родным языком более чем для 80 % населения Земли.

Сложность этапа проектирования, в ходе которого тысячи конструкторов, обладающих сотнями различных навыков, взаимодействуют по проектам с участием структур, состоящих из миллионов компонентов, чрезвычайно высока. В таких условиях очень трудно отследить последние изменения в дизайне и ошибки проектирования, последствия которых могут быть очень серьезными, если их скорейшим образом не выявить и не устранить.

### **1.4. Новый подход к решению проблемы**

Новое решение проблемы управления ЖЦ, которое было разработано авторами и их командами, основано на утверждении, что сложная система может моделироваться и управляться только другой сложной системой [8].

Поэтому новая система управления ЖЦ была разработана как адаптивная сеть вычислительных услуг, основанная на мультиагентных технологиях,

а не на используемых в настоящее время монолитных компьютерных программах. В качестве узлов этой сети выступают элементарные процессы в рамках ЖЦ, которые разрабатываются независимо, один за другим, а затем компонуются в приложения ЖЦ. Каждое приложение является уникальной адаптивной сетью услуг, направленных на достижение функции управления ЖЦ.

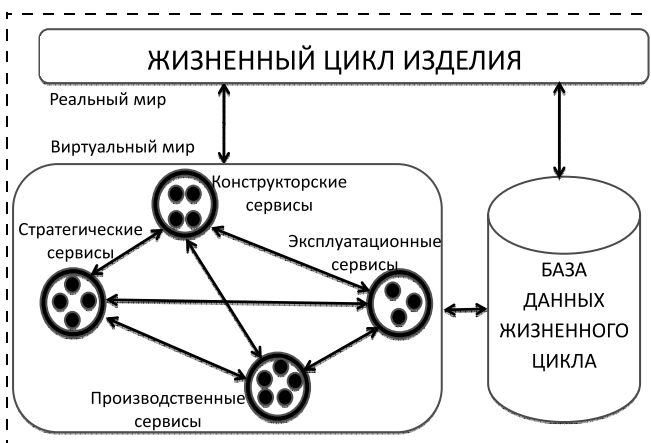
Система или сервис, которые управляют сложной системой, должны иметь необходимый уровень детализации и необходимый уровень сложности [8].

Необходимый уровень детализации для Сервиса управления ЖЦ изделия — это детализация, которая позволяет системе выявлять, хранить и обрабатывать каждый из миллионов составляющих элементов, а также все ресурсы проектирования, производства и эксплуатации. Система такого масштаба не может быть спроектирована в виде единого интегрированного блока. Подход заключается в том, чтобы обнаружить процессы, вполне самодостаточные для того, чтобы сформировать элементарные сервисы, которые могут быть внедрены с использованием мультиагентных технологий, и обеспечить, чтобы эти сервисы, являющиеся роями агентов по существу, сотрудничали и/или конкурировали друг с другом с помощью процесса переговоров [9].

Необходимый уровень сложности для Сервиса управления ЖЦ изделия — это такая сложность, которая позволяет процессам управления адаптироваться к любому изменению в ЖЦ продукта. Это требование противоречит традиционному мнению о том, что сложные системы можно упростить путем разделения их на автономные подсистемы, которые затем могут быть рассмотрены отдельно, одна за другой. Этот подход известен как редукционизм, который хорошо сочетается с методом декомпозиции. Редукционизм, конечно, применим для детерминированных систем и может работать в системах с очень низкой сложностью, но для таких уровней сложности, которые в настоящее время испытывают предприятия, в том числе и в аэрокосмической отрасли, этот подход не адекватен. Вместо упрощения мы должны встраивать сложность в системы управления, для того чтобы соответствовать сложности их физической сущности и соответствующей экономической среды.

Сложность была встроена в Сервис управления ЖЦ изделия путем предоставления частичной автономности агентам за счет возможности переговоров друг с другом о том, как решать каждую стоящую перед ними задачу. При этом агенты должны обращаться к базе знаний о ЖЦ, прежде чем приступать к каким-либо действиям. Кроме того, необходимо обеспечить возможность легко изменять связи между агентами при необходимости. Методы, используемые для разработки сложности в Сервисе управления ЖЦ изделия, подробно описаны в работе [8].

Сервис управления ЖЦ изделия с достаточным уровнем детализации и сложности может быть реализован с использованием мультиагентной технологии, работающей на основе онтологии [10, 11], как это представлено на рисунке.



Архитектура адаптивного Сервиса управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности

В базе данных ЖЦ содержатся все концептуальные знания (онтология) и данные, необходимые для управления всем ЖЦ.

Виртуальный мир состоит из сервисов, которые представлены в виде мультиагентных ролей (группировок) в реальном времени, каждый из которых отвечает за определенную функцию процесса управления ЖЦ (стратегическая функция, проектирование, производство, эксплуатация), соответствующую узлам адаптивной сети сервисов. Каждый сервис, в свою очередь, состоит из простейших взаимосвязанных сервисов, предназначенных для общения друг с другом и доступа к базе знаний ЖЦ через сеть ЖЦ. Простейшие сервисы могут располагаться в разных географических локациях.

Существует принципиальная разница между фазой проектирования ЖЦ и остальными фазами (производство, эксплуатация, вывод из эксплуатации). Суть проектирования — в создании изделия и его срока службы, которого еще не существует. В начале фазы проектирования нет ни компонентов, ни конфигурации, ни онтологии. Все, что мы имеем, это неполный набор деталей выбранного изделия (компоненты, конфигурации и онтологии), которые могут быть использованы во время фазы проектирования [12].

Проектные работы можно разделить на две категории:

- 1) создание новых деталей изделия;
- 2) выбор существующих деталей изделия.

В то время как создание новых деталей в настоящее время успешно выполняется инженерами-конструкторами, автоматизация процесса выбора из существующих деталей аэрокосмических изделий может существенно помочь делу.

Не стоит забывать о важности оценок проектирования. Они также могут быть разделены на две категории:

- 1) оценка соответствия проекта требованиям ЖЦ и эстетическим критериям;
- 2) оценка согласованности проекта (в частности, проверка возможности конфликта в ситуации, когда над проектом работает большая группа конструкторов).

В первом случае для оценки проекта необходимы люди, а для выполнения задач второй категории гораздо эффективнее будет использовать мульти-агентное программное обеспечение.

Кроме того, конструкторам необходим быстрый доступ к знаниям об эксплуатации предыдущих спроектированных изделий, для этого нами был разработан расширенный сервис адаптивного поиска конструкторских знаний.

Разработка сервиса управления ЖЦ изделий является эволюционной. База знаний находится в начальном (стандартном) состоянии, а затем она может быть расширена в случае необходимости. Сервисы могут добавляться по одному, позволяя использовать и тестировать систему на практике с самого начала ее разработки и расширять ее при необходимости.

Главными узлами Сервиса управления ЖЦ изделия являются следующие сервисы (см. рисунок):

- *стратегические сервисы:*
  - сервис адаптивного прогнозирования,
  - сервис адаптивного долгосрочного планирования;
- *сервисы проектирования:*
  - сервис адаптивного выбора компонент,
  - сервис адаптивной согласованности проекта,
  - сервис адаптивного обнаружения конструкторских знаний;
- *сервисы управления производством:*
  - сервис адаптивного планирования цепочек поставок,
  - сервис адаптивного планирования производства;
- *сервисы управления эксплуатацией:*
  - сервис адаптивного прогнозирования отказов,
  - сервис адаптивного технического обслуживания и планирования ремонта авиатехники,
  - сервис адаптивного содержания персонала и планирования ремонта,
  - сервисы адаптивного обеспечения авиатехники и планирования ресурсов.

Это неполный список возможных сервисов, но он включает в себя те из них, которые с наибольшей вероятностью увеличат производительность и снизят затраты ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности. Фаза вывода из производства будет рассмотрена на более позднем этапе.

Вышеперечисленные сервисы управления ЖЦ изделия, в свою очередь, состоят из следующих простейших сервисов:

- сервис адаптивного планирования кадровых ресурсов;
- сервис адаптивного планирования материальных ресурсов;
- сервис адаптивного планирования транспортировки;
- сервис адаптивной загрузки;
- сервис адаптивной маршрутизации;
- сервис адаптивного обнаружения знаний;
- сервис адаптивного моделирования;
- сервис адаптивного выбора компонентов;
- сервис адаптивной согласованности проекта.

Простейшие сервисы, перечисленные выше, были тщательно протестированы в различных коммерческих приложениях, большинство из которых находятся в постоянной эксплуатации: планирование доставки грузов на Международную космическую станцию в реальном времени [8], оценка согласованности проектов в реальном времени [8], планирование сетей поставок компании LEGO в реальном времени [13], планирование 2000 машин такси Лондона в реальном времени [14], планирование аренды автомобилей в реальном времени [15], планирование дорожных перевозок в реальном времени [16, 17], планирование производства в реальном времени [18, 19], планирование обслуживающего персонала в реальном времени [20], планирование магистральных железных дорог в реальном времени [21].

### Заключение

В основе нового решения существующей задачи управления ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности лежат проверенные методы науки о сложности, обеспечивающие весомую экономическую выгоду при использовании в сложных условиях. Предложенное решение дает следующие преимущества [8]:

- все кадровые и материальные ресурсы, а также само предприятие рассматриваются как заинтересованные лица и представлены личными программными агентами. Расписания и прогнозы создаются в ходе переговоров агентов, продолжающихся до тех пор, пока не будет достигнут консенсус. Таким образом, обеспечивается распределенное принятие решения и расширение прав и возможностей заинтересованных сторон;
- на смену автоматическому поиску оптимальных решений, работающему в режиме пакетной обработки и требующему значительного количества времени (обычно от 8 до 10 ч), приходит быстрый обмен сообщениями между агентами, что значительно ускоряет процесс разрешения конфликтов. Соответственно, расписания и прогнозы создаются на порядок быстрее, чем с помощью традиционных оптимизаторов;
- агенты обращаются к базе знаний перед тем, как что-либо предпринять, а следовательно, сервисы управляются знаниями, а не данными, демонстрируя эмерджентный интеллект. Агенты работают круглосуточно, либо находя новые решения, либо улучшая ранее найденные решения;
- сервисы планирования работают в режиме реального времени, следовательно, каждый из них при возникновении непредвиденных событий способен перепланировать размещение ресурсов с минимальными изменениями в ранее составленных расписаниях (например, при появлении непредвиденного требования или отсутствии ожидаемого требования). Таким образом, система управления ЖЦ адаптируется к изменениям ЖЦ, которым она управляет;

- сервисы прогнозирования (например, прогнозирование потребности или прогнозирование отказов) являются динамическими, поэтому при появлении непредвиденных событий, нарушающих ранее данный прогноз, они способны адаптировать прогнозы в режиме реального времени;
- все программные сервисы: а) способны взаимодействовать друг с другом, б) имеют доступ к базе знаний, в) выводят результаты на общий сервисный интерфейс;
- заказчики вносят небольшую плату за индивидуальную настройку и подписываются на любые услуги по выбору за ежемесячную оплату. Здесь нет никаких капиталовложений;
- разработка и реализация программных сервисов являются эволюционными. Начав с одного сервиса, заказчики могут добавлять новые сервисы при необходимости.

В дальнейшем для достижения наибольшего эффекта улучшения управления ЖЦ изделий мы решили сосредоточиться на разработке и реализации адаптивного сервиса хранения и планирования запасных частей, что дает возможность повысить надежность выполнения запланированных полетов и одновременно снизить время и затраты на техническое обслуживание.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.*

#### Список литературы

1. **Knezevic J.** Reliability, Maintainability and Supportability: A probabilistic Approach. McGraw-Hill, 1993.
2. **Knezevic J.** Systems Maintainability: Analysis, Engineering and Management. Springer, 1997.
3. **Prigogine I.** The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature. Free Press, 1997.
4. **Prigogine I.** Is Future Given? World Scientific Publishing Co., 2003.
5. **Kaufman S.** At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. Oxford Press, 1995.
6. **Holland J. H.** Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Addison Wesley, 1995.
7. **Holland J.** Emergence: from Chaos to Order. Oxford University Press, 1998. 258 p.

8. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, WIT Press, 2014.
9. **Rzevski G.** Self-organization in social systems // Онтология проектирования. 2014. № 4 (14). С. 8–17.
10. **Виттих В. А., Моисеева Т. В., Скобелев П. О.** Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий // Онтология проектирования. 2013. № 2 (8). С. 20–25.
11. **Скобелев П. О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. 2013. № 2 (8). С. 26–48.
12. **Боргест Н. М.** Научный базис онтологии проектирования // Онтология проектирования. 2013. № 1 (7). С. 7–25.
13. **Madsen B., Skobelev P., Rzevski G., Tsarev A.** Real-Time Multi-agent Forecasting and Replenishment Solution for LEGO Branded Retail Outlets // International Journal of Software Innovation. IGI Global. 2013. V. 1, Iss. 2. P. 28–39.
14. **Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P.** Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies // Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10–15, 2009, Budapest, Hungary. P. 29–35.
15. **Andreev S., Rzevski G., Shveykin P., Skobelev P., Yankov I.** Multi-Agent Scheduler for Rent-A-Car Companies // Proc. of the Forth Int. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2009, Linz, Austria. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009. V. 5696. P. 305–314.
16. **Himoff J., Rzevski G., Skobelev P.** Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation // Proc. of the Fifth Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Hakodate, Japan, 2006. P. 1541–1521.
17. **Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A.** Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system // Proc. of the 5th Int. Conf. on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15–18, 2013, Barcelona, Spain. SciTePress, 2013. V. 2. P. 244–249.
18. **Tyrin I., Vylegzhanin A., Kolbova E., Kuznetsov O., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** Multi-Agent System "Smart Factory" for Realtime Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory // Proc. of the 2012 IEEE 17th Int. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), September 17–22, 2012, Krakow, Poland. 4 p. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489694.
19. **Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaia D., Shepilov Ya., Tsarev A.** Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22–24, 2013, Sao Paulo, Brazil, 2013. P. 204–209.
20. **Блинов С. В., Сердюк В. Е., Онищенко Г. В., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Очков Д. С., Царев А. В., Томин В. А.** Мультиагентная система управления мобильными бригадами для Средневожской газовой компании // Тр. XIV Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, 22–25 июня 2012 г. Самара: СНЦРАН, 2012. С. 741–745.
21. **Шабунин А. Б., Кузнецов Н. А., Скобелев П. О., Бабанин И. О., Кожевников С. С., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В.** Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 23–29.

## A New Approach to Managing Life Cycle of Aerospace Products using Complexity Theory

**G. A. Rzevski**, rzevski@gmail.com, Open University, MK7 6AA, United Kingdom, Buckinghamshire, Milton Keynes, Walton Hall, **J. Knezevic**, MIRCE Akademy, Exeter, UK  
**P. O. Skobelev**, petr.skobelev@gmail.com✉, **N. M. Borgest**, borgest@yandex.ru,  
**E. V. Simonova**, simonova.elena.v@gmail.com, Samara State Aerospace University, 443086, Samara, Russian Federation, **O. I. Lakhin**, lakhin@yandex.ru,  
 "SEC "Smart Solutions" Ltd., 44301 Samara, Russian Federation

*Corresponding author: Skobelev Petr O., Dr. Sc. Tech., Senior Researcher at the Institute of Complex Systems Control of the Russian Academy of Sciences, Professor at Department for aircraft construction and engineering of Samara State Aerospace University, Head of Department for electronic systems of information security of Samara State Technical University. Work address: office center "Vertikal" 12th floor, 17 Moskovskoe shosse, Samara 44301, Russian Federation, Tel./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: petr.skobelev@gmail.com*

*Received on January 28, 2015  
 Accepted on February 16, 2015*

**Problem statement:** The lifecycle of a large aerospace product consists of a very large number of interconnected activities, which are normally partitioned into several phases such as Design, Production, Operation and Decommissioning. Today, there is no central lifecycle management system. A new approach to the aerospace product lifecycle management based on concepts and principles of Complexity Science is described in this paper. **Methods:** A new lifecycle management system is suggested — Product Lifecycle Management (PLM) Service has been designed as an adaptive network of computational services based on multi-agent technology with ontology. **Results:** A concept of PLM system that have a requisite granularity and requisite complexity in order to manage other complex system. Advantages of the suggested approach are shown based on the complex aerospace products example. Basic components of PLM Service architecture are specified and their interaction mechanism is described. A decision to use ontologies for conceptual knowledge description, required to manage the whole lifecycle and multi-agent approach for interconnected services network design where each server is dedicated to a particular lifecycle management function is justified. An architecture of an adaptive Aerospace PLM Service is developed. Developed models and methods of decision-making support in different system components allow to provide an appropriate reaction to the disruptive events on all aerospace products lifecycle phases. **Practical value:** The new solution to the existing problem of aerospace products lifecycle management with PLM Service provides distributed decision-making capable of revising the decision in real time whenever a disruptive event occurs, productivity improvement and costs reduction of aerospace product lifecycles.

**Keywords:** product lifecycle, lifecycle management, PLM Service, decision-making support, adaptive management, multi-agent technologies, ontology

**Acknowledgements:** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Rzevski G. A., Knezevic J., Skobelev P. O., Borgest N. M., Simonova E. V., Lakhin O. I. A New Approach to Managing Life Cycle of Aerospace Products using Complexity Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 282—288.

DOI: 10.17587/mau/17.282-288

### References

1. Knezevic J. Reliability, Maintainability and Supportability: A probabilistic Approach, McGraw-Hill, 1993.
2. Knezevic J. Systems Maintainability: Analysis, Engineering and Management, Springer, 1997.
3. Prigogine I. The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature, Free Press, 1997.
4. Prigogine I. Is Future Given? World Scientific Publishing Co., 2003.
5. Kaufman S. At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford Press, 1995.
6. Holland J. H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity, Addison Wesley, 1995.
7. Holland J. Emergence: from Chaos to Order, Oxford University Press, 1998, 258 p.
8. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity, WIT Press, 2014.
9. Rzevski G. Self-organization in social systems, *Ontology of Designing*, 2014, no. 4 (14), pp. 8—17 (in Russian).
10. Vittikh V. A., Moiseeva T. V., Skobelev P. O. Prinyatie reshenii na osnove konsensusa s primeneniem mul'tiagentnykh tekhnologii (Decision making on the basis of consensus using multi-agent technologies), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 2 (8), pp. 20—25 (in Russian).
11. Skobelev P. O. Situatsionnoe upravlenie i mul'tiagentnye tekhnologii: kollektivnyi poisk soglasovannykh reshenii v dialoge (Situatiun-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 2 (8), pp. 26—48 (in Russian).
12. Borgest N. M. Nauchnyi bazis ontologii proektirovaniya (Scientific basis for the ontology of designing), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 1 (7), pp. 7—25 (in Russian).
13. Madsen B., Skobelev P., Rzevski G., Tsarev A. Real-Time Multi-agent Forecasting and Replenishment Solution for LEGO Branded Retail Outlets, *International Journal of Software Innovation, IGI Global*, 2013, vol. 1, iss. 2, pp. 28—39.
14. Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies, *Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*, Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10—15, 2009, Budapest, Hungary, pp. 29—35.
15. Andreev S., Rzevski G., Shveykin P., Skobelev P., Yankov I. Multi-Agent Scheduler for Rent-A-Car Companies, *Proc. of the Forth Int. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2009*, Linz, Austria, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2009, vol. 5696, pp. 305—314.
16. Himoff J., Rzevski G., Skobelev P. Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation, *Proc. of the Fifth Int. Joint Conf on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Hakodate, Japan, 2006, pp. 1541—1521.
17. Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013)*, February 15—18, 2013, Barcelona, Spain, SciTePress, 2013, vol. 2, pp. 244—249.
18. Tyrin I., Vylegzhanin A., Kolbova E., Kuznetsov O., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya. Multi-Agent System "Smart Factory" for Real-time Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory, *Proc. of the 2012 IEEE 17th Int. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, September 17—22, 2012, Krakow, Poland, 4 p. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489694.
19. Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaia D., Shepilov Ya., Tsarev A. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production, *Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13)*, May 22—24, 2013, Sao Paulo, Brazil, 2013, pp. 204—209.
20. Blinov S. V., Serdjuk V. E., Onishhenko G. V., Skobelev P. O., Larjuhin V. B., Ochkov D. S., Carev A. V., Tomin V. A. Mul'tiagentnaya sistema upravleniya mobil'nymi brigadami dlja Srednevolzhskoj gazovoj kompanii (Multi-Agent System for Managing Mobile Teams for Samara Region Gas Distributor), *Proc. of XIV Int. Conf. on Complex Systems, June 22—25, 2013*, Samara, Russia, pp. 741—745 (in Russian).
21. Shabunin A. B., Kuznecov N. A., Skobelev P. O., Babanin I. O., Kozhevnikov S. S., Simonova E. V., Stepanov M. E., Carev A. V. Razrabotka mul'tiagentnoj sistemy adaptivnogo upravleniya resursami OAO "RZhd" (Multi-agent system for railways resource management), *Mechatronika, Automation, Control*, 2013, no. 1, pp. 23—29 (in Russian).

## Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 26.01.2016. Подписано в печать 15.03.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН416. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансдес солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансдес солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.